



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
FACULTAD DE GEOGRAFÍA



---

**SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO IXTLAHUACA-  
ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO. ANÁLISIS  
ESPACIO-TEMPORAL (1970-2010)**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:  
**MIGUEL RAMÍREZ ANGELES**

DIRECTOR DE TESIS:  
**DR. JOSÉ LUIS EXPÓSITO CASTILLO**

REVISORES:  
**ECATSIG. ALEJANDRA GONZÁLEZ BECERRIL**  
**MTRO. LUIS RICARDO MANZANO SOLÍS**

## DEDICATORIA

*Esta tesis la dedico a Dios por darme nueva luz en mi vida,  
fortaleza para seguir adelante y no desfallecer en el intento.  
Agradezco a la persona que me dio un nuevo inicio de vida  
al donarme una parte de ella.*

*A mi madre María Luisa por su amor incondicional, por su  
sacrificio, por estar con migo en los momentos más difíciles  
de mi vida y por creer siempre en mí.*

*A mis hermanos: Angélica, Mayra, Mariela y  
Luis Alberto, por su apoyo y comprensión a  
través de mi vida y trayectoria académica.*

*“Muéstrame un obrero con grandes sueños y en él encontrarás un hombre que puede cambiar la historia.  
Muéstrame un hombre sin sueños, y en él hallarás a un simple obrero”*

*James Cash Penny*

## AGRADECIMIENTOS

- Un sincero agradecimiento y admiración al Dr. José Luis Expósito Castillo por su ayuda, comprensión, tiempo, por compartir sus conocimientos y orientación para poder culminar este trabajo.
  
- A mis revisores, Mtro. En C.A. Luis Ricardo Manzano Solís y ECATSIG. Alejandra González Becerril por sus recomendaciones desde la perspectiva de su área de investigación y su tiempo otorgado en la revisión de este trabajo.
  
- A mis maestros y compañeros por su gran apoyo y motivación para la culminación de mis estudios.

## RESUMEN

El proceso de sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos es un suceso que afecta a todas las actividades humanas y principalmente a los ecosistemas, cierto es que el hombre ha abusado en el consumo de los recursos hídricos subterráneos al grado que ha modificado la calidad, cantidad y ubicación del agua disponible, así como de la temporalidad de los fenómenos meteorológicos, es por esto la necesidad de comprender el régimen de la sobreexplotación para poder gestionarlo y establecer estrategias adecuadas para su manejo sustentable, ya que no se puede gestionar algo que no se conoce.

En la presente investigación se muestra la evolución espacial y temporal de los descensos del agua subterránea durante el periodo de 1970-2010, a través del análisis de los multipiezómetros del área de estudio en los diferentes años, con el objetivo de conocer el estado actual del Acuífero Ixtlahuaca-Atlatomulco.

En este marco se identificaron las áreas que presentan escenarios críticos, debido al proceso de sobreexplotación del acuífero. Así como aquellas que muestran recuperación en los niveles de agua subterránea, se realizó una sobreposición de las diferentes variables sociales y físicas, además de un pronóstico para el año 2030, a través de la interpolación de los valores de profundidad.

Finalmente se plantean recomendaciones, con la finalidad de atender las áreas más afectadas por el proceso de sobreexplotación del acuífero, minimizando así los efectos negativos producidos a causa de este proceso.

Los resultados obtenidos permitirán hacer comparaciones con otros acuíferos que presenten características similares, además servirá como herramienta de gestión a los tomadores de decisiones para diseñar estrategias que ayuden a fortalecer los instrumentos de política ambiental.

## ÍNDICE

### Capítulo 1

<b>Introducción</b> .....	10
1.1 Generalidades.....	10
1.2 Antecedentes.....	11
1.3 Planteamiento del problema.....	14
1.4 Justificación.....	15
1.5 Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivo específico.....	17

### Capítulo 2

<b>Caracterización de la zona de estudio</b> .....	18
2.1 Localización y características generales.....	18
2.2 Marco geológico.....	27
2.3 Marco hidrogeológico.....	31

### Capítulo 3

<b>Marco teórico conceptual</b> .....	35
3.1 Conceptualización.....	35
3.2 El agua subterránea en el contexto mundial.....	39
3.3 El agua subterránea en México.....	41
3.4 Sobreexplotación del agua subterránea en el acuífero Ixtlahuaca- Atlacomulco.....	44

## Capítulo 4

<b>Marco metodológico</b> .....	45
4.1 Recopilación, análisis y síntesis de la información disponible relacionada con el área temática de estudio.....	45
4.1.1 Delimitación del acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco.....	47
4.1.2 Obtención del mapa geológico e hidrogeológico.....	47
4.1.3 Compilación de datos demográficos.....	48
4.1.4 Localización de los multipiezómetros del AI-A.....	48
4.2 Análisis y caracterización del proceso evolutivo de la sobreexplotación del AI-A a través de los niveles piezométricos.....	49
4.3 Identificación de los principales efectos ambientales originados por la sobreexplotación del agua subterránea y su relación con las principales actividades socioeconómicas.....	51
4.4 Integración e interpretación de la información.....	52

## Capítulo 5

<b>Resultados y discusión</b> .....	53
5.1 Análisis de la funcionalidad de los multipiezómetros del área de estudio.....	53
5.2 Análisis espacio-temporal del abatimiento del nivel del agua subterránea en el periodo 1970-2010.....	56
5.3 Análisis espacio-temporal de las tasas de abatimiento del agua subterránea para los periodos 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010.....	59
5.4 Sobreposición de tasas anuales con variables socioeconómicas (conjuntos urbanos, industrias), físicas (geología) y efectos ambientales (grietas).....	71
5.5 Pronóstico prospectivo para el año 2030.....	75
5.6 Formulación de alternativas de solución que permitan minimizar los problemas producidos por la sobreexplotación del AI-A.....	77

## Capítulo 6

<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	79
6.1 Conclusiones.....	79
6.2 Recomendaciones.....	80
<b>Referencias</b> .....	82
<b>Anexos</b> .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Localización, límite físico y límite establecido por CONAGUA del acuífero Ixtlahuaca Atlacomulco (AI-A).....	19
Figura 2.2	Distribución del clima en el AI-A (Elaborado con datos del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 1991).....	20
Figura 2.3	Distribución de la precipitación promedio anual del AI-A (CONAGUA, 2009).....	21
Figura 2.4	Población total de los 10 municipios que conforman el AI-A del periodo 1990-2010.....	23
Figura 2.5	Total de habitantes del AI-A 1990-2010.....	24
Figura 2.6	Ubicación de las zonas industriales en el AI-A (Elaborado con datos del FIDEPAR, 2010).....	26
Figura 2.7	Mapa geológico del AI-A (Elaborado con datos del IFOMEGEM, 1994).....	29
Figura 2.8	Mapa donde se muestra la red de drenaje dendrítico y los principales cuerpos de agua en el AI-A (Elaborado con datos del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 1991).....	33
Figura 2.9	Mapa hidrogeológico del AI-A (Elaborado con datos del IFOMEGEM, 1994).....	34
Figura 3.1	Esquema ilustrativo del sistema hidrogeológico de un acuífero semiconfinado (Molinero, 2005).....	36

Figura 3.2	Distribución del agua en el mundo (Fuente: USGS, 2010).....	39
Figura 3.3	Diagrama ilustrativo donde se muestra la extracción y usos del agua en México (Arreguín, 2011).....	43
Figura 4.1	Esquema metodológico para el desarrollo del trabajo investigativo.....	46
Figura 4.2	Esquema ilustrativo del cono de descenso (Abatimiento) de un pozo perforado producido al bombear agua (Molinero, 2005).....	49
Figura 5.1	Representación en el área de estudio de los multipiezómetros de acuerdo a su grado de funcionalidad (Con base en CONAGUA).....	54
Figura 5.2	Isolíneas de abatimiento del AI-A para el periodo 1970-2010 (Con base en CONAGUA, 2010).....	58
Figura 5.3	Isolíneas de abatimiento del AI-A para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010).....	61
Figura 5.4	Isolíneas de las tasas de abatimiento del AI-A para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010).....	62
Figura 5.5	Isolíneas de abatimiento del AI-A para el periodo 2000-2005 (Con base en CONAGUA, 2010).....	65
Figura 5.6	Isolíneas de las tasas de abatimiento del AI-A para el periodo 2000-2005 (Con base en CONAGUA, 2010).....	66
Figura 5.7	Isolíneas de abatimiento del AI-A para el periodo 2005-2010 (Con base en CONAGUA, 2010).....	69
Figura 5.8	Isolíneas de las tasas de abatimiento del AI-A para el periodo 2005-2010 (Con base en CONAGUA, 2010).....	70
Figura 5.9	Sobreposición de tasas anuales y abatimientos con variables geográficas...	73
Figura 5.10	Ampliación de la Sobreposición de tasas anuales de abatimiento con variables geográficas.....	74
Figura 5.11	Proyección para el año 2030.....	76



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Total de habitantes por municipio 1990 – 2010. (Elaborado con datos del INEGI 1900, 1995, 2000, 2005, 2010).....	24
Tabla 5.1	Número de multipiezómetros, cuales funcionan y cuales no tienen registro en las mediciones hasta los 100-150m de profundidad y su causa (Con base en CONAGUA).....	55
Tabla 5.2	Abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 1970-2010 (con base en CONAGUA).....	57
Tabla 5.3	Abatimiento y tasas del nivel del agua subterránea para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010).....	60
Tabla 5.4	Abatimiento y tasas del nivel del agua subterránea para el periodo 2000-2005 (Con base en CONAGUA, 2010).....	64
Tabla 5.5	Abatimiento, tasas del nivel del agua subterránea para el periodo 2005-2010 y pronóstico 2030 (Con base en CONAGUA, 2010).....	68

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 GENERALIDADES

Hablar de agua es un sinónimo de vida y bienestar, elemento indispensable para el desarrollo económico y social de una región. Una de las prioridades del mundo y de nuestro país es garantizar la sostenibilidad del agua al uso urbano. Los mantos acuíferos son la fuente que ofrece la mayor calidad en el recurso o donde el agua tiene la mayor posibilidad de ser potable, es por esto priorizar acciones encaminadas a la sustentabilidad de este recurso. Las extracciones incontroladas de agua constituyen una agresión al medio ambiente, lo cual deteriora y a su vez degrada las reservas de agua subterránea, además pone en riesgo muchas actividades humanas y trae consigo una pérdida de la calidad de vida.

La importancia del agua se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios, ya que el total de volumen concesionado para usos consuntivos son de origen subterráneo, esto quiere decir que alrededor del 37% (30.1 Miles de millones de metros cúbicos por año al 2010), se extraen del subsuelo para satisfacer los diferentes usos del agua (Atlas del Agua en México 2012), es por esto la necesidad de realizar trabajos interdisciplinarios relacionados a temas hídricos, enfocados a la prevención y recuperación de los recursos hídricos subterráneos.

Este documento está enfocado a identificar y evaluar la evolución espacio-temporal de los descensos piezométricos del acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco, además de mostrar los escenarios reales que se presentan en la región en relación con la explotación del acuífero, el documento facilitará además reorientar las políticas de desarrollo y la gestión integral de los recursos hídricos del área.

## 1.2 ANTECEDENTES

El agua subterránea es un recurso natural vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, y juega un papel fundamental (pero frecuentemente poco apreciado) en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos y terrestres (Foster, 2002). Este recurso se origina fundamentalmente de las precipitaciones atmosféricas que se infiltran a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y, eventualmente, llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos (IMTA, 2009).

La sobreexplotación de los acuíferos es uno de los múltiples problemas que afectan el manejo sustentable del agua subterránea, este se puede definir de una forma sencilla, como la extracción de agua del mismo en una cantidad superior a la correspondiente a su alimentación, en un periodo de tiempo suficientemente largo, como para diferenciar las consecuencias similares que tendrían periodos anómalamente secos (Pulido, 1998). Este proceso es la principal causa de las subsidencias y agrietamientos del terreno.

Entre los efectos indeseables derivados del proceso de sobreexplotación de los recursos hídricos, se encuentran los siguientes: (Pulido, 1998);

- Descenso de los niveles piezométricos
- Compactación inducida del terreno
- Aumento de los costos de explotación
- Deterioro de la calidad del agua
- Abandono de pozos
- Modificaciones inducidas en el régimen de los ríos
- Afección o secado de zonas húmedas
- Problemas legales por afección a los derechos de terceras personas
- Problemas en redes de evacuación y roturas de infraestructuras
- Inducción de hundimientos y colapsos
- Inducción de contaminación procedente de grandes distancias

Muchos países han obtenido enormes beneficios derivados del desarrollo y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos, que constituyen una fuente de abastecimiento de acceso flexible y de bajo costo para la población urbana, la actividad industrial, el riego agrícola, y la supervivencia rural. No obstante, la magnitud de la demanda de agua subterránea que ha impuesto tanto la expansión urbana, como los cultivos bajo riego en las zonas más áridas de la región, ha alcanzado niveles tales que ponen en duda la sostenibilidad de este recurso natural.

El crecimiento económico en México ha ocurrido sin tener en cuenta las señales de escasez de agua. La concentración de la población y la actividad económica han creado zonas de alta insuficiencia, no sólo en las regiones de baja precipitación pluvial, sino también en las zonas donde no se percibía como un problema. (Diario Oficial de la Federación, 2009).

Las aguas subterráneas desempeñan un papel de creciente importancia en el crecimiento socioeconómico del país gracias a sus características físicas que les permite ser aprovechadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero. Funcionan además como filtros purificadores, preservando la calidad del agua.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud de volumen utilizado por los principales usuarios. Alrededor del 38% del volumen total concesionado para usos consuntivos (31.8 mil millones de metros cúbicos por año al 2012) proceden del agua subterránea.

De los 653 acuíferos que se han identificado en el país, el número de acuíferos sobreexplotados en los últimos años han oscilado entre 100 y 106. Al 31 de Diciembre de 2012 se reportan 106 acuíferos sobreexplotados, de estos se extrae el 54.72% del agua subterránea para todos los usos (CONAGUA, 2013).

En México el agua subterránea se usa para el riego de 2 millones de hectáreas (un tercio de la superficie total bajo riego) y cubre 50% de la demanda de la industria, el suministro de 70% de las ciudades y el de casi toda la población rural. La relevancia de este centenar de acuíferos, que representa menos de 20% del total del país, es que suministran cerca de 80% del volumen total de agua extraída del subsuelo. Los casos críticos se presentan en estados del centro y norte de la República Mexicana, en particular en la cuenca del río Lerma (Guanajuato y Querétaro); en la región de La Laguna (Coahuila-Durango); en la península de Baja California; en Aguascalientes, Chihuahua, Sonora y el Valle de México (Foro Consultivo Científico y Tecnológico, 2012).

La sobreexplotación de los acuíferos con los que cuenta el territorio nacional, representan más de la mitad de la extracción de agua subterránea en el país, esta ha colocado a México en una crisis del líquido. Además, el crecimiento demográfico y urbano, la industrialización, el avance tecnológico, el surgimiento de nuevas necesidades de diversos sectores de la población, políticas públicas inadecuadas o insuficientes, entre otros factores, provocan la ruptura del ciclo del agua y con ello la necesidad de considerar nuevos elementos para superar esta problemática estructural y de complejidad creciente (La Crónica de hoy, 2012).

Según datos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2005), anualmente México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así, el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados.

En este marco muchas de las cuencas del país están caracterizadas por una extracción intensiva de agua subterránea, entre ella destaca la cuenca del alto Lerma, la cual ha estado subordinada desde la colonia al interés económico, ya que en este periodo la producción

maicera fue remplazada por la ganadera. Sin embargo, la transformación más drástica se dio a partir de la segunda mitad del siglo XIX con el proyecto de desecación de las lagunas del Lerma y alcanzó su punto más crítico en las décadas de 1970 y 1980 cuando se consolidó el proceso de industrialización, además de continuar suministrando agua potable a la Ciudad de México, una de las ciudades más grandes del mundo. Fue en este periodo cuando comenzaron las obras para captar las aguas de los manantiales que alimentaban las Lagunas de Almoloya del Río y por tanto, al Río Lerma. Una de estas obras fue la excavación de varias galerías, conectadas a un dren (Red de drenaje), que tenían como propósito reunir el agua de los manantiales localizados en Almoloya del Río, Texcaltengo, Alta Empresa y Ameyalco. (Archivo Histórico del Agua, 2005).

Dentro de la cuenca del alto Lerma se circunscribe el Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco (AI-A), el cual presenta problemas de insostenibilidad en los recursos hídricos subterráneos, ya que el acuífero en la actualidad es capaz de abastecer el 32.59% de agua subterránea a la población actual, y para el año 2030 sólo aportará 27.06% de la demanda de este recurso, lo que no es suficiente para satisfacer las necesidades de la población local y las actividades económicas que se desarrollan dentro de esta (Conrado, 2012).

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Durante los últimos años el AI-A ha presentado problemas de sobreexplotación de sus recursos hídricos subterráneos, esto debido al crecimiento acelerado de la población, al desarrollo de las actividades económicas y al abasto de agua al Valle de México. La sobreexplotación en el AI-A ha traído un descenso continuado de los niveles del agua subterránea en diferentes áreas del acuífero, lo que ha provocado agrietamientos del terreno, de seguir así estas tendencias se podrían generar graves riesgos ambientales y repercusiones negativas en los ámbitos sociales, económicos y políticos.

Según datos de CONAGUA (2009) en el AI-A han ocurrido abatimientos de los niveles del agua durante el periodo de 1971-96, que van de 5 a 25 m. con un ritmo de abatimiento de poco menos de 0.5 a 1 m. por año, siendo el área más afectada, la que se encuentra al noreste de

Ixtlahuaca, debido a la intensidad del bombeo y la cercanía de los pozos ahí emplazados, es por esto la necesidad de tomar medidas encaminadas a minimizar los impactos producidos por la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, hacer conciencia en los pobladores de esta región y adoptar una cultura enfocada al cuidado y preservación de los recursos hídricos. Permitiendo esto garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas y el consumo de los pobladores de esta región.

Según CONAGUA (2009) las causas de la sobreexplotación del AI-A radican no sólo en el consumo local para uso público urbano, la agricultura, la ganadería e industria, sino en el envío de las aguas subterráneas al Distrito Federal (DF), Datos del Diario Oficial de la Federación (2009) indican que la extracción ( $208 \text{ mm}^3$ ) es superior a la recarga ( $119 \text{ mm}^3$ ). A través del tiempo esto ha venido ocasionado depresiones en el terreno, principalmente en el área de Ixtlahuaca, provocadas estas por el bombeo, esto ha generado un mayor costo de extracción y ha provocado que un número mayor de pobladores de esta zona no tenga acceso a este recurso.

La solución de los problemas a corto y largo plazo dependerá de la participación activa de los gestores y del manejo sustentable de los recursos hídricos, lo cual minimizará los impactos y riesgos que se pueda suscitar en esta área de estudio. Para obtener mejores resultados en un corto, mediano y largo plazo dependerá de las medidas estructurales (Obras de ingeniería civil) y no estructurales (Planes, políticas, concientización, gestión, entre otras) que se tomen en consideración para minimizar los impactos producidos por el proceso de sobreexplotación.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

El mantener en condiciones óptimas los recursos hídricos es de vital importancia, principalmente los subterráneos, no solo a nivel local, sino a nivel nacional y mundial, ya que esto permite mantener el desarrollo y la calidad de vida de los habitantes, eliminar un daño ecológico resultaría económicamente un gasto excesivo, debido a esto resulta más fácil prevenirlo. El uso adecuado y sostenible de los recursos hídricos subterráneos permite

mantener un equilibrio ecológico y contrarresta los problemas ambientales que se suscitan debido a su sobreexplotación, minimizando los daños ecológicos y económicos.

El AI-A abastece de agua subterránea a la mayor parte de la región del área de estudio y a una gran parte del Distrito Federal. Además garantiza el agua para los diferentes usos: agrícolas y público-urbano. La sobreexplotación de este acuífero puede provocar diversos problemas ambientales, tales como: subsidencias y agrietamientos del terreno, desecación de los cuerpos de agua, aumento a la vulnerabilidad de contaminación del acuífero o problemas económicos como el aumento de los costos de extracción. Tal situación ha derivado a que el tema de la sobreexplotación del acuífero se discuta en los diferentes ámbitos de gobierno y académicos.

Es por esto la necesidad de una investigación que demuestre que los efectos ambientales que se han producido en la región, son debidos a un uso excesivo y a un manejo inadecuado de los recursos subterráneos, además que facilite la comprensión de las tendencias actuales y espaciales del proceso de explotación excesiva del acuífero, ya que en la actualidad se carece de investigaciones que se relacionen directamente a la sobreexplotación del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco con algún problema ambiental en el área.

La necesidad de realizar un análisis espacio-temporal de la sobreexplotación del AI-A es debido a la insuficiente información con la que se cuenta del área y a la falta de trabajos investigativos relacionados con la temática de estudio. Mediante este trabajo se pretende entender el proceso de sobreexplotación en el acuífero, tanto de forma espacial como temporal, y con esto favorecer la localización de los posibles problemas ambientales, además de la integración de dichas zonas a los programas de ordenamiento territorial u otros planes de gestión, de esta manera se facilita el manejo sustentable del recurso agua subterránea en el Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco.

La investigación se realizó para el periodo 1970-2010 por ser este el periodo del cual se cuenta con información sobre la evolución de los niveles piezométricos.



## 1.5 OBJETIVOS

- **Objetivo general**

Analizar y caracterizar la evolución espacial y temporal del proceso de sobreexplotación del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco en el periodo 1970-2010.

- **Objetivos específicos**

1.- Recopilar, analizar y sintetizar la información disponible relacionada con el área y temática de estudio.

2.- Analizar y caracterizar el proceso evolutivo de la sobreexplotación del acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco a través de los niveles piezómetros.

3.- Analizar las principales áreas donde se presentan abatimientos de niveles piezométricos, conocer los efectos ambientales originados por la sobreexplotación del agua subterránea y su relación con las actividades socioeconómicas.

4.- Aplicar los Sistemas de Información Geográfica para el análisis, procesamiento de la información y presentación de resultados.

5.- Proponer alternativas de solución que ayuden a minimizar los problemas de sobreexplotación del AI-A

# Capítulo 2

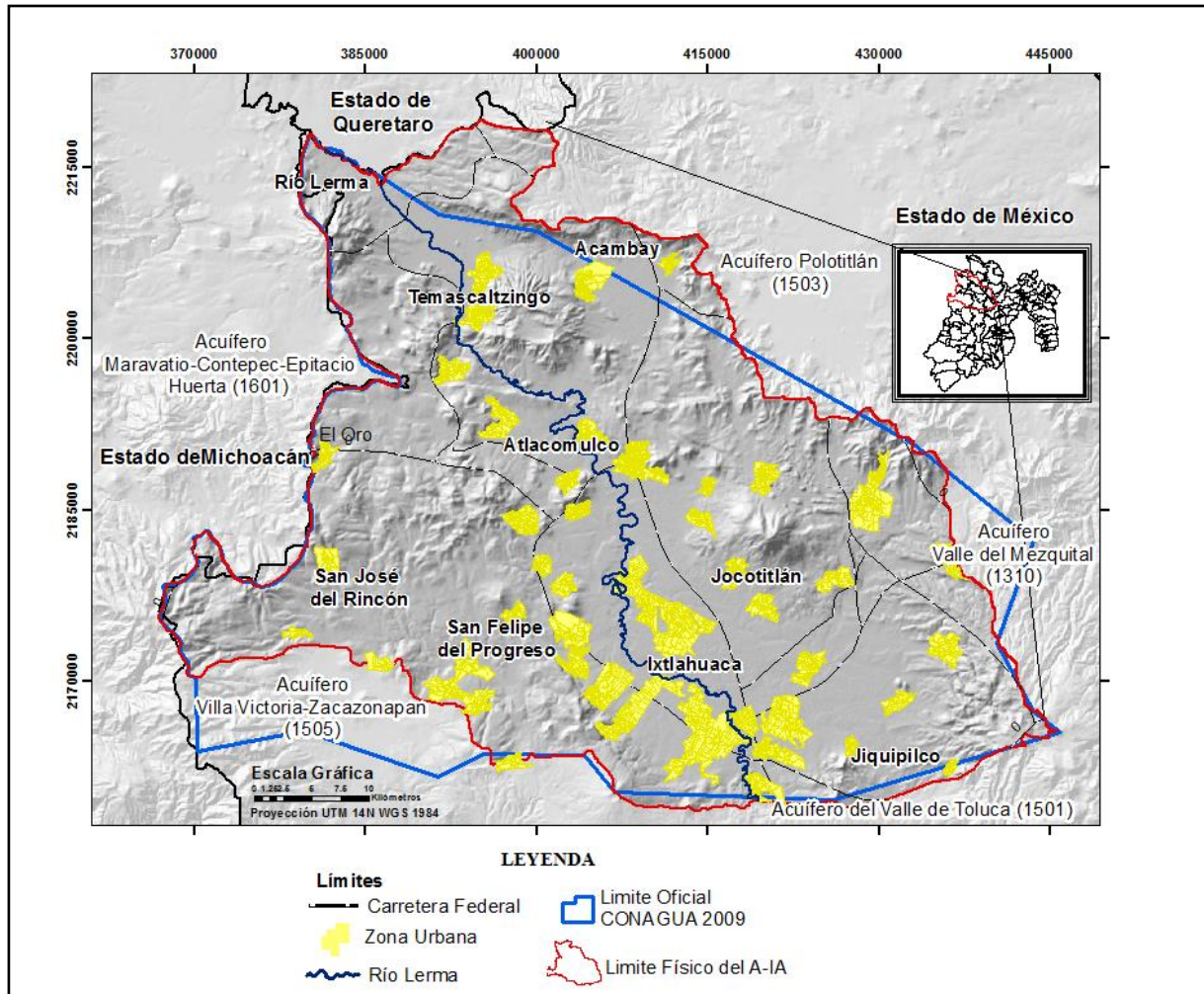
## Caracterización de la zona de estudio

### 2.1 LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

La región del AI-A se encuentra ubicada en el Estado de México, dentro de la cuenca alta del Río Lerma y situado al sur del altiplano Mexicano, cubre un área total aproximada 2,894 km. A esta región se tiene acceso por la carretera federal No. 55, la que une a la ciudad de México con las localidades de Toluca de Lerdo, Ixtlahuaca de Rayón, Atlacomulco de Fabela y Acambay de Ruiz.

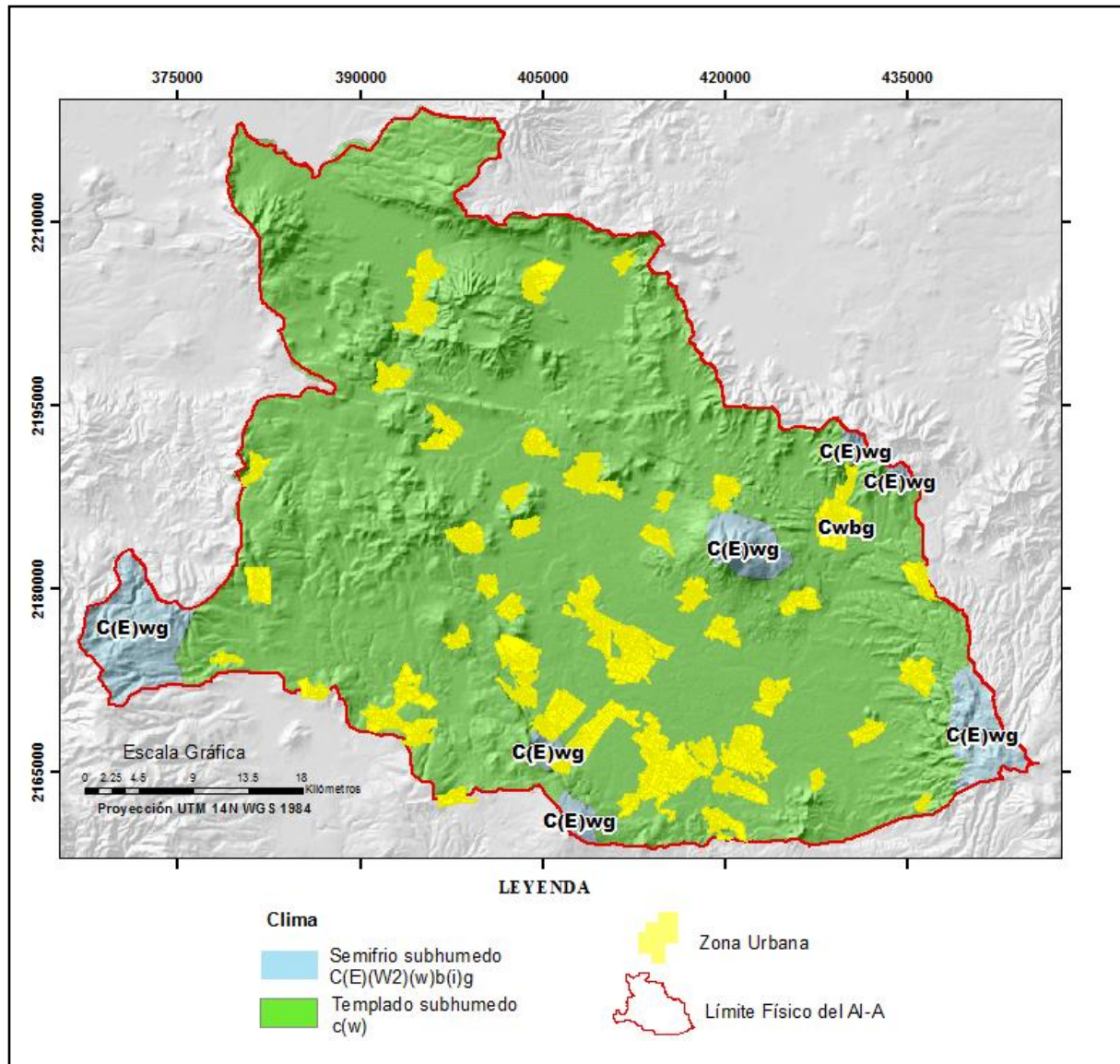
Geográficamente, colinda al noroeste con el acuífero Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta con clave (1601) que se encuentra en el Estado de Michoacán, al noreste limita con el acuífero de Polotitlán con clave (1503), y al sureste con el acuífero Valle del Mezquital con clave (1310), al suroeste limita con el acuífero Villa Victoria- Zacazonapan con clave (1505), y al sur limitan con el acuífero del Valle de Toluca con clave (1501) (CONAGUA 2002). Esta zona está emplazada, principalmente, en los municipios de: Ixtlahuaca de Rayón, San Felipe del Progreso, Jiquipilco y Jocotitlán.

Cabe señalar que aunque la disposición no es significativa, en este caso no se utilizó el límite oficial del acuífero establecido por CONAGUA, se tomaron como base los límites físicos (Parte aguas de la cuenca), gran parte del curso medio y parte del curso bajo del Río Lerma. Esto con el fin de facilitar la integración de este trabajo a otras investigaciones futuras de carácter hidrológico que se desarrollen en la región. En la figura 2.1 se muestran los límites físicos del acuífero, así como el límite establecido por CONAGUA, y la localización geográfica del acuífero



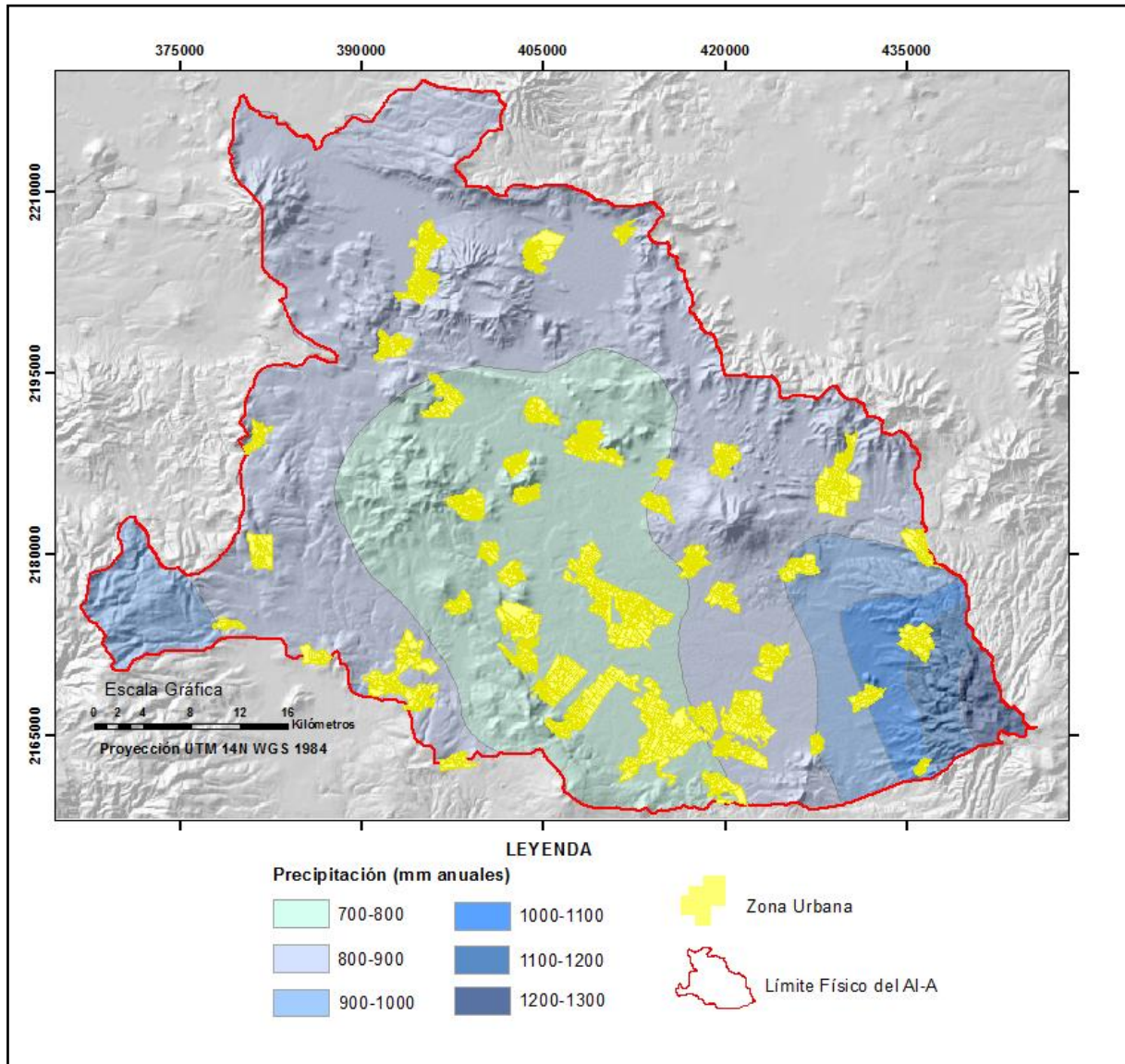
**Figura 2.1** Localización, límite físico y límite establecido por CONAGUA del Acuífero Ixtlahuaca-Atzacomulco (Elaborado con datos del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 1991) CONAGUA 2009.

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por Enriqueta García (1981), el clima que predomina en la región del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco está dividido en dos tipos, templado subhúmedo con lluvias en verano, es el que se encuentra más ampliamente distribuido en la región de interés y se ubica en las partes bajas del valle, el semifrío subhúmedo con lluvias en verano, se localiza en la porción suroccidental de la región (figura 2.2).



**Figura 2.2** Distribución del clima en el AI-A (Elaborado con datos del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 1991).

En lo que a la precipitación media anual se refiere (Figura 2.3), esta oscila entre 653 y 861 mm, en las porciones altas, mientras que en las bajas es de 700 y 800 mm. La temperatura tiene valores de 17.5 y 9.5° C, en los meses de mayo y enero, respectivamente, siendo mayo el mes más caluroso del año, y diciembre y enero, los más fríos. La evaporación potencial oscila entre 1433 a 1618 mm.



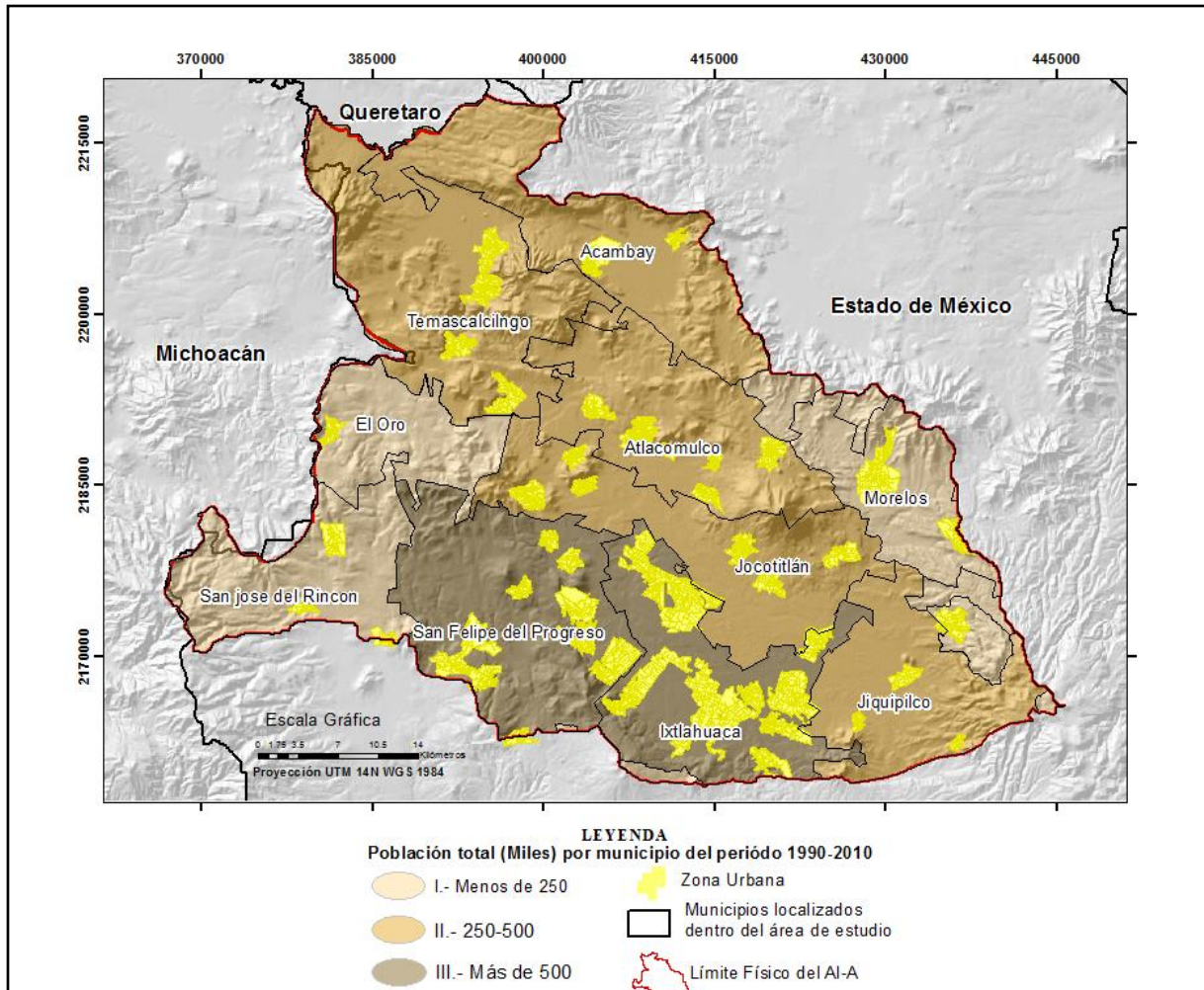
**Figura 2.3** Distribución de la precipitación promedio anual del AI-A (CONAGUA, 2009).

En 2010 México contaba con una población de 108.8 millones de habitantes aproximadamente. De 1950 a 2005, la población del país se cuadruplicó, y pasó de ser predominantemente rural (57.4%) a principalmente urbana (76.5%). Al mismo tiempo la tasa de crecimiento media anual disminuyó significativamente. La mayor tasa se presentó en el periodo 1960-1970 (3.40%), para después crecer hasta llegar a un valor de 1.02% en el periodo 2000-2005 (Atlas digital del agua, 2010). Este fenómeno demográfico se asocia con una importante sobreexplotación de los acuíferos.

El estado de México cuenta con una población de 15, 175,862 habitantes, lo cual representa el 13.5% de la población nacional (Consejo Estatal de Población, 2009), siendo este uno de los más poblados del país, cuenta con zonas industriales de gran importancia, debido a la cercanía con el distrito federal y a su crecimiento excesivo.

Los 10 municipios que conforman el AI-A para el año 2010 contaban con una población de 764, 661 habitantes (Tabla 2.1), lo cual representa el 0.68% con relación al estado de México. En un periodo de 20 años la población de los municipios que integran el área de interés ha crecido el 49.1%, lo cual indica que la demanda de agua subterránea ha aumentado significativamente con el crecimiento demográfico, entre los municipios que mayor crecimiento han tenido destacan principalmente San Felipe del Progreso e Ixtlahuaca, esto se puede observar en la figura 2.4

En el periodo 1990-2010 la población total de los municipios que conforman el acuífero Ixtlahuaca-Atzacmulco muestran un crecimiento poblacional paulatino, ya que de 1990 al 2010 hubo un incremento poblacional de más de 250,000 habitantes en un periodo de 20 años (Figura 2.5). Cabe mencionar que San Felipe del Progreso es el municipio con mayor población, en su mayoría personas que hablan alguna lengua indígena y el municipio con un alto índice de marginalidad, de este análisis se deduce que el aumento en la disminución de los niveles piezométricos es en gran parte ocasionada por el acelerado crecimiento poblacional, ya que al crecer la población aumenta la demanda de servicios, esto genera una mayor demanda de agua, lo cual propicia una extracción excesiva del agua subterránea.

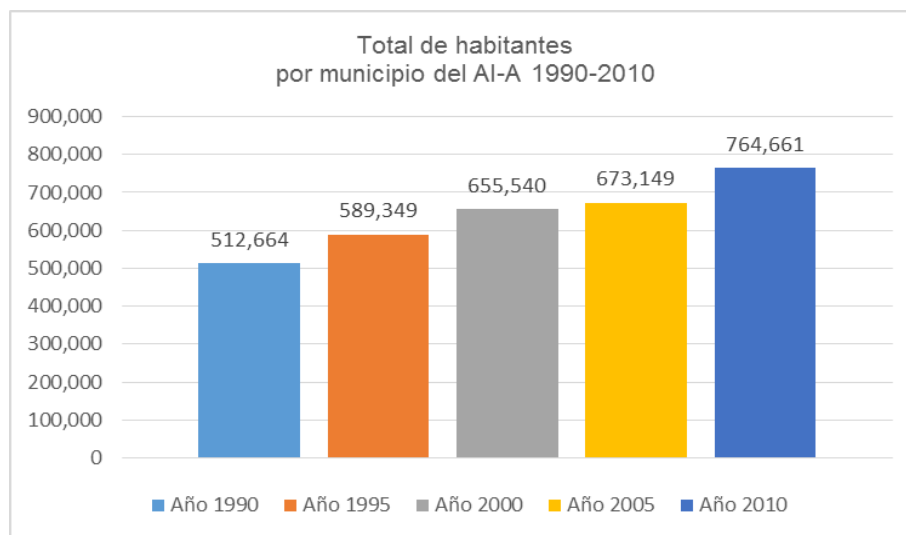


**Figura 2.4** Población total de los 10 municipios que conforman el AI-A del periodo 1990-2010 (Elaborado con datos del Censo de Población y Vivienda (INEGI) de los años de 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010).

**Tabla 2. 1** Total de habitantes por municipio 1990 – 2010. (Elaborado con datos del INEGI 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).

Municipios	Años					Total de Hab. Por Municipio
	1990	1995	2000	2005	2010	
Acambay	47,517	52,662	58,389	56,849	60,918	127,696
Atlacomulco	54,067	65,018	76,750	77,831	93,718	151,660
Ixtlahuaca	88,545	107,628	115,165	126,505	141,482	171,290
Jiquipilco	44,012	51,447	56,614	59,969	69,031	251,657
Jocotitlán	39,077	43,994	51,979	55,403	61,204	276,335
Morelos	21,853	24,016	26,971	26,430	28,426	281,073
El Oro	25,490	29,466	30,411	31,847	34,446	293,247
San Felipe del Progreso	140,834	155,978	177,287	100,201	121,396	367,384
Temascalcingo	51,269	59,140	61,974	58,169	62,695	579,325
San José del Rincón				79,945	91,345	695,696
<b>Total</b>	<b>512,664</b>	<b>589,349</b>	<b>655,540</b>	<b>673,149</b>	<b>764,661</b>	<b>3,195,363</b>

Nota: San José del Rincón se constituye como municipio a partir del año 2001.



**Figura 2.5** Total de habitantes del AI-A 1990-2010. (Elaborado con datos del INEGI 1990, 1995, 2000, 2005, 2010).



Dentro del área de estudio las principales actividades económicas que se desarrollan son: la agricultura, la ganadería, la industria y el comercio de productos agropecuarios. La agricultura es de tipo de temporal y de riego, la cual es abastecida por los cuerpos de agua que se presentan en la región, tales como presas y manantiales. Entre los productos que se obtiene de la agricultura está la alfalfa, frijol, hortalizas, papa, entre otros.

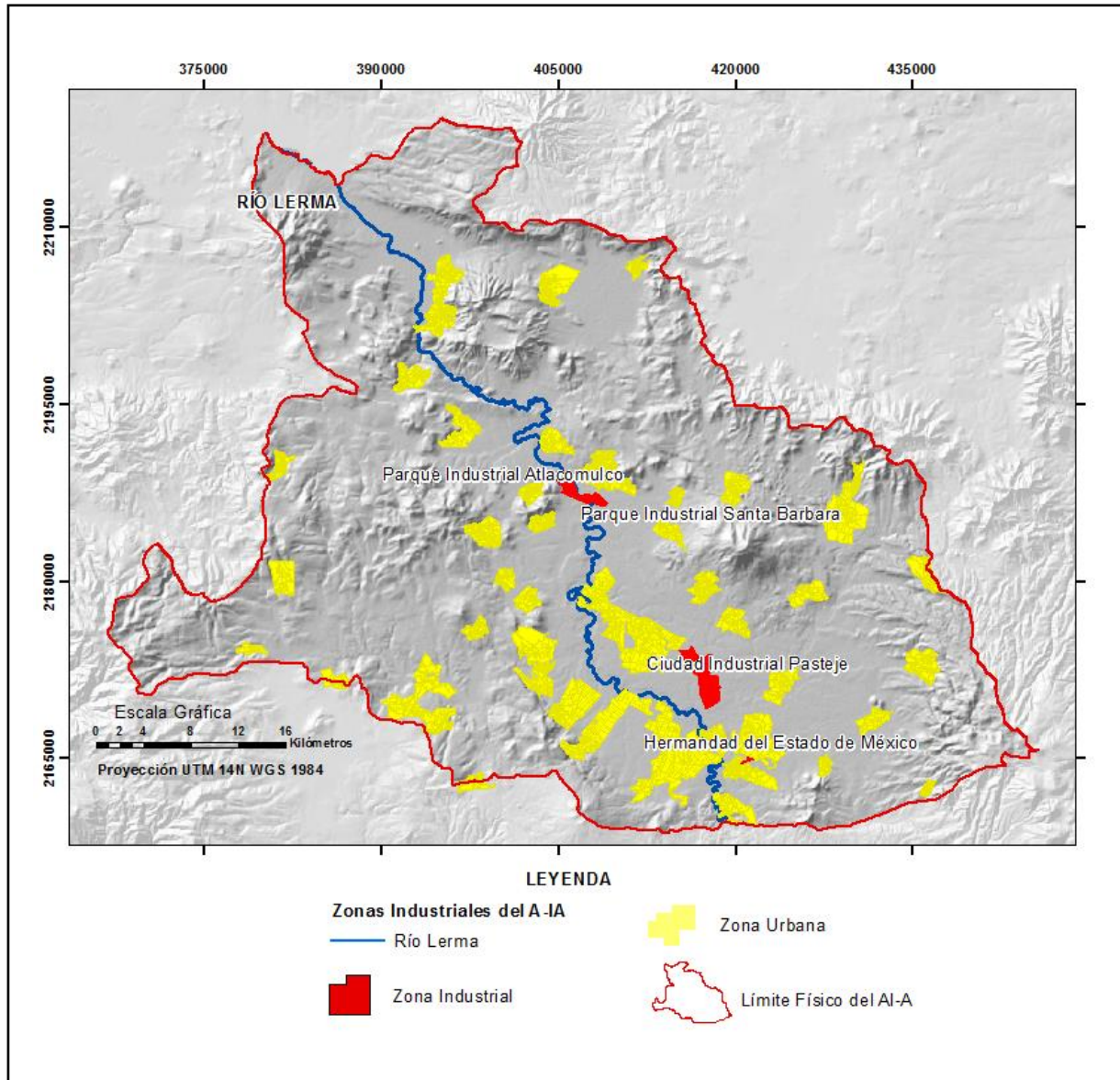
En la zona de estudio existe una ganadería de tipo familiar, dentro de la cual solo es para satisfacer las necesidades básicas de la población local, destacando principalmente el ganado vacuno, del cual se comercializan productos de cárnicos y lácteos, por otra parte la explotación de aves de corral para la obtención de carne de pollo y huevo no es muy significativa.

De acuerdo a los datos obtenidos por el fideicomiso para el desarrollo de parques y zonas industriales en el Estado de México (FIDEPAR, 2010) en la región de estudio existen cuatro zonas industriales de gran importancia económica, las cuales se muestran en la figura 2.6, de los cuales se puede mencionar; el parque industrial “Atlacomulco 2000” el cual produce productos tales como; ropa, aparatos eléctricos; tales como refrigeradores Ojeda, productos farmacéuticos, alimenticios, productos elaborados de madera, artículos educativos y recreativos, manufacturas, hidrocarburos; Sony gas, vasos desechables, solventes industriales entre otros. Esta zona cuenta con una superficie de 107.02 ha, además de contar con un pozo profundo de 100 metros de profundidad y una planta tratadora de aguas residuales.

En la zona industrial “Pasteje” ubicada en el municipio de Jocotitlán se elaboran productos de material eléctrico (IUSA, es uno de los mayores productores de cobre a nivel mundial), productos relacionados con aviones de fumigación y confecciones pasteje la cual elabora prendas de vestir y el conjunto industrial urbano Ixtlahuaca donde se comercializan productos para vestir (baby crazy) y productos relacionados con la construcción, contando con una superficie de 32 ha. Estas zonas industriales son puntos de interés económico de la región ya que generan empleos a los pobladores e incentivan la economía de la región.

Debido a la potencialidad de recursos hídricos con la que cuenta el área de interés podrían proyectarse como polos de desarrollo y posibles zonas de alta de inversión económica. La

principal actividad de esta región es el comercio de productos agrícolas, la cual se distribuye principalmente en los municipios de Atlacomulco e Ixtlahuaca, siendo este una fuente de ingresos para la mayoría de los pobladores de la región.



**Figura 2.6** Ubicación de las Zonas Industriales en el AI-A (Elaborado con datos del FIDEPAR, 2010).

## 2.2 MARCO GEOLÓGICO

Según datos obtenidos de la gerencia de aguas subterráneas de CONAGUA (2009). La zona de estudio se ubica en la porción centro oriental de la provincia fisiográfica “Meseta Neovolcánica” o “Eje Neovolcánico”, delimitada por los extremos meridionales de la Sierra Madre Occidental, de la Mesa Central y de la Sierra Madre Oriental, al norte de la región, mientras que al sur colinda con la Cuenca del Balsas y con la Meseta Oaxaqueña.

Esta provincia se caracteriza por presentar grandes aparatos volcánicos, de composición basáltica y andesítica, que se le asocian a tobas y cenizas volcánicas, así como a la presencia de grandes lagos situados en fosas tectónicas. En este marco, el valle de Ixtlahuaca-Atacomulco es una planicie con altura promedio de 2,500 msnm, donde destaca el cerro de Jocotitlán.

Geomorfológicamente, se observa en la zona la acción de los agentes de erosión que han moldeado el relieve, tales como: procesos magmáticos, tectónicos, erosivos y de relleno. Los eventos acaecidos en la región, originaron cuencas endorreicas rellenas por depósitos piroclásticos y, localmente, lacustres, intercalados con cenizas volcánicas, así como fracturas y fallas, tales como las de Toxhi y Perales-Ixtlahuaca, al norte y oeste de la zona de interés, respectivamente.

Las rocas más antiguas se localizan en las cercanías de la región minera El Oro-Tlalpujahuá y el anticlinal Tzitzio-Huetamo, que son rocas metamórficas del Jurásico Superior- Cretácico Inferior; le siguen las rocas volcánicas del Oligoceno Superior, representadas por lavas y piroclastos depositados en las laderas de los aparatos volcánicos; la actividad volcánica continúa hasta nuestros días.

Dentro del Terciario se encuentran las andesitas, que afloran en los extremos oriental y occidental de la zona de interés, formando los núcleos de las sierras altas, que en sí, son parte del parteaguas ahí ubicado. Los piroclásticos están conformados por material tobáceo, limo-arcilloso, depositados en los pie de montes, siendo materiales gruesos que pasan a finos en las

partes bajas de los valles; a veces se les encuentra formando lomas de pendientes fuertes a moderadas, siendo su permeabilidad de media a baja, según su grado de fracturamiento, aunque puede funcionar como acuífero de potencial reducido.

En el Terciario Superior, aparecen los basaltos que afloran en la parte occidental de la zona, y han sido afectados por una falla con orientación suroeste-noreste; además, presentan fracturamiento intenso, aunque la mayor parte de las veces se les encuentra cubiertos por material tobáceo; su permeabilidad es media a alta y funcionan como zona de recarga y como acuíferos de buen potencial.

Hacia el Cuaternario se forman las tobas de grano fino, en la porción oriental de la región, las que cubren los materiales volcánicos más antiguos, y que presentan baja permeabilidad. Los basaltos cuaternarios afloran en la parte norte y en las inmediaciones del cerro de Jocotitlán, son masivos y muy fracturados, constituyendo mesetas con arroyos profundos. Por su fracturamiento son muy permeables, lo que hace que funcionen como zona de recarga y que constituyan buenos acuíferos en el subsuelo.

Localmente, afloran: andesitas, basaltos, piroclásticos, lahares y materiales aluviales con edades del Terciario hasta el Cuaternario. Una descripción más detallada de las unidades estratigráficas se observa en la figura 2.7 de acuerdo al Instituto de Geología de la UNAM.

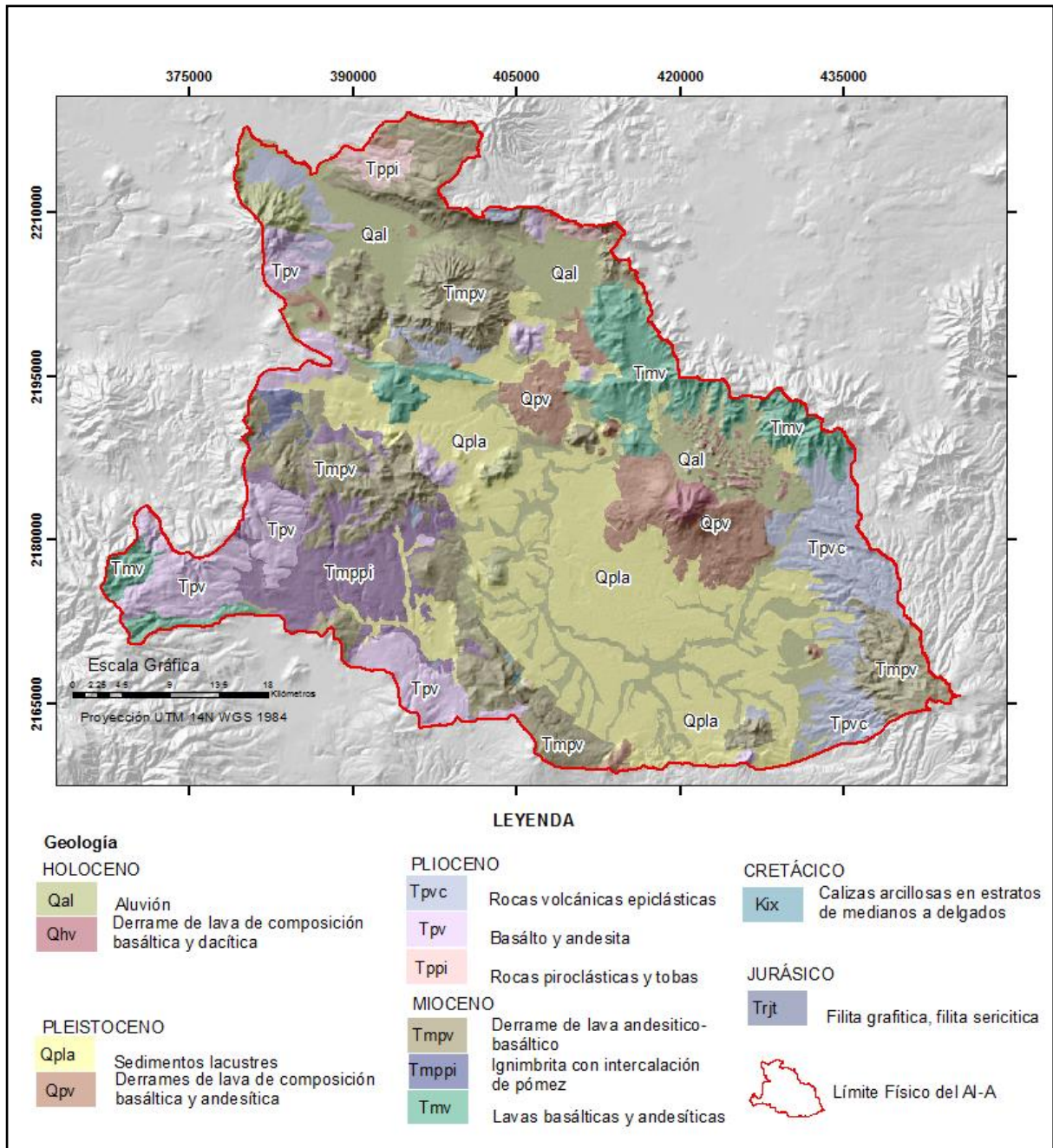


Figura 2.7 Mapa Geológico del AI-A (Elaborado con datos del IFOMEGEM, 1994).

**Qal.** Aluvión: grava, arena y limo con interstratificación de ceniza volcánica en el valle del acuífero Ixtlahuaca - Atlacomulco, y en otras depresiones pequeñas, resultado la actividad volcánica, así como a lo largo de ríos y arroyos.

**Qhv.** Derrames de lava de composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas asociadas. Estas se localizan al noreste del volcán de Jocotitlan.

**Qpla.** Sedimentos lacustres. Incluyen: conglomerado, arenisca y limolita semi-consolidados, interstratificados con capas de toba, pómez y diatomita, estas se localizan en el valle del acuífero.

**Qpv.** Derrames de lava composición esencialmente basáltica y andesítica con depósitos cineríticos, aglomerado y brecha de derrame asociados al volcán de Jocotitlan y otras depresiones pequeñas en la porción norte, resultado la actividad volcánica.

**Tpvc.** Principalmente rocas volcánicas epiclásticas, abanicos aluviales coalescentes, así como depósitos laháricos y de ceniza volcánica en algunos lugares en la zona sureste y noreste del acuífero.

**Tpv.** Incluye basalto y andesita, las cuales se localizan al suroeste y noreste del área de estudio.

**Tppi.** Rocas piroclásticas y tobas se localizan principalmente en el Municipio de San José del Rincón y el municipio del Oro en la zona oeste de la zona estudio.

**Tmpv.** Derrame de lava andesítico-basáltica, rocas volcánicas indiferenciadas, principalmente andesíticas.

**Tmppi.** Ignimbrita con intercalación de pómez, está se localiza en pequeñas porciones al norte del área de estudio.

**Tmv.** Lavas basálticas y andesíticas, dacita, rocas volcánicas

.

**Kix.** Formación Xochipala: caliza arcillosa en estratos delgados a medianos con intercalaciones de lutita filitizada, arenisca conglomerática, grauvaca y lava almohadilla de composición andesítico-basáltica

**Trjt.** Esquisto Taxco: Filita graffítica, filita sericitica, esquisto de sericita y metatoba riolítica. La unidad posee un metamorfismo regional correspondiente a la facies de esquisto verde.

### 2.3 MARCO HIDROGEOLÓGICO

Según la gerencia de aguas subterráneas de CONAGUA (2009). El área de estudio se circunscribe dentro de la Región Hidrológica No. 12, denominada “Río Lerma-Chapala”. La red hidrográfica ha desarrollado un sistema de corrientes del tipo radial en los cerros, aunque aparece, también, el drenaje dendrítico (Figura 2.8) en las cabeceras de los mismos; en los depósitos de las laderas de las sierras existen corrientes tipo uniforme y corrientes paralelas al sur de la zona. En el área, la corriente de mayor importancia es el río Lerma, que fluye, en la zona, con dirección sureste a noroeste.

Estratigráficamente el AI-A esta conformado básicamente por dos tipos de formaciones rocosas (Figura 2.9): las formadas por rocas consolidadas fracturadas y las formadas por sedimentos jóvenes no consolidados porosos (CONAGUA, 2002).

El acuífero de la zona de Ixtlahuaca-Atlacomulco está conformado principalmente por materiales lacustres y depósitos aluviales, de granulometría y porosidad variable; los primeros cubren al valle desde el sur de Ixtlahuaca hasta el norte de Atlacomulco; de igual forma, se encuentra limitado al norte y noreste por rocas volcánicas básicas, al este y al sur por tobas y aglomerados, al suroeste por basaltos y al oeste por rocas de composición andesítica; su espesor es un poco mayor que 300 m. Rodeando al valle se encuentran las rocas volcánicas lávicas con buena potencialidad hidrogeológica, que funcionan como zonas de recarga hacia el acuífero del valle. Se le considera un acuífero del tipo semiconfinado

Al centro del valle se presentan tobas lacustres y forman el relleno de la zona de interés, intercaladas con arenas, arcillas y limos de espesor variable, como su permeabilidad, lo que hace que sean buenas formadoras de acuíferos, aunque en algunos sitios disminuye su potencialidad, debido al contenido de arcilla en ellos.

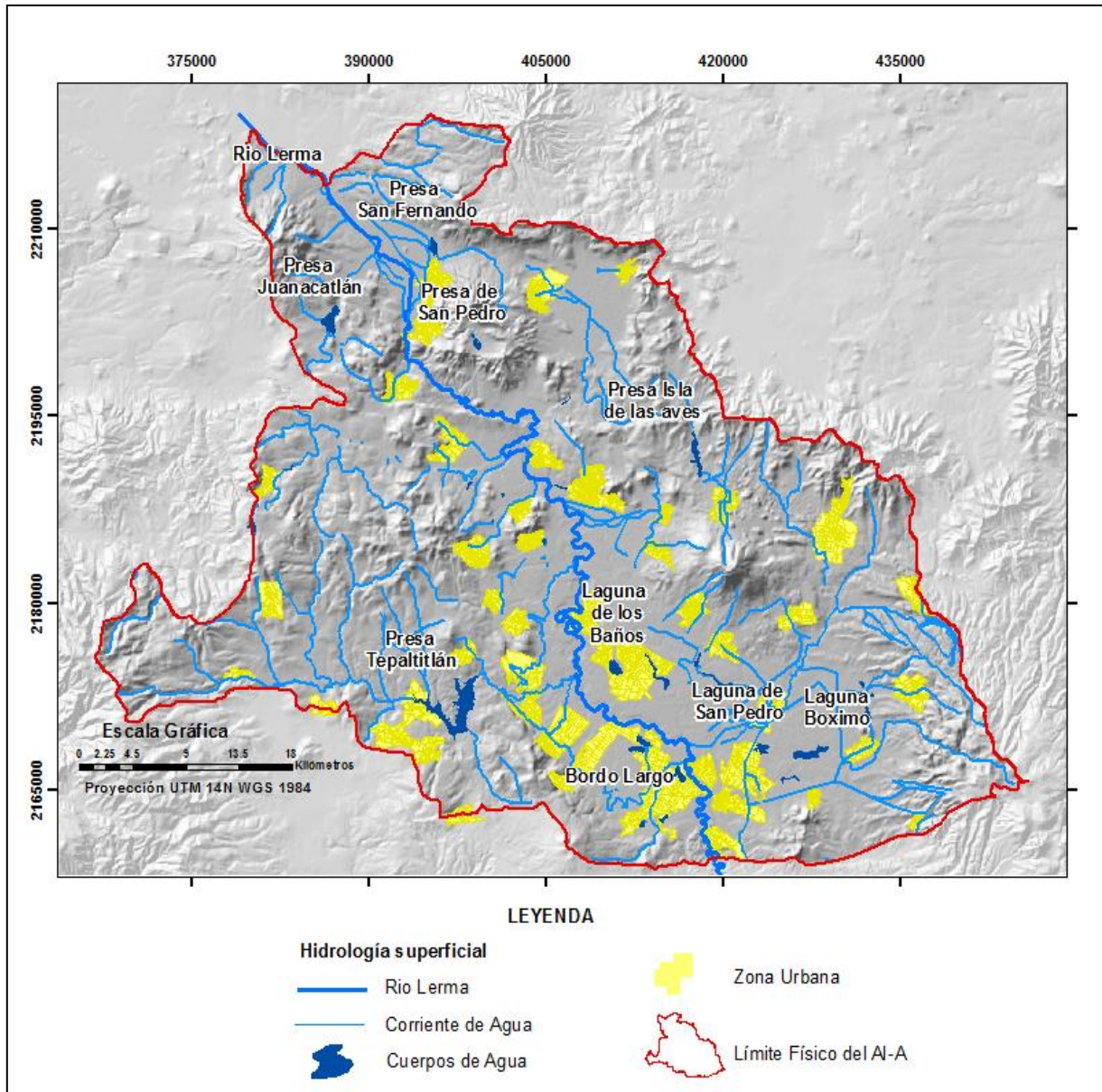
Por su parte, los conos volcánicos antiguos, constituidos por derrames de lavas y materiales Piroclásticos de origen basáltico, se localizan al este de Atlacomulco y al sur de San Felipe del Progreso; su permeabilidad es media, por lo que funciona como zona de recarga en superficie, pero como un acuífero de mediano potencial, en el subsuelo.

El movimiento del agua subterránea en la zona de interés se realiza a través de los basaltos de edad Terciario y Cuaternario, tobas y aglomerados y, principalmente, en los depósitos aluviales que rellenan el valle.

La recarga tiene lugar por la infiltración del agua de lluvia que pasa a través del fracturamiento de las rocas y llega a zonas más permeables, mientras que la descarga se produce por salidas del acuífero a través de manantiales y por el bombeo. Funciona como acuífero libre, el conformado por basaltos que afloran en el cerro de Jocotitlán, y semiconfinado, el que actualmente se explota en materiales de relleno.

Finalmente, el aluvión –limos, arenas y gravas-, producto del acarreo, se exhibe en los cauces del río Lerma y algunos arroyos tributarios; presenta buena permeabilidad por lo que funciona como zona de recarga, aunque por su reducido espesor, no llegan a formar acuíferos.





**Figura 2.8** Mapa donde se muestra la red de drenaje dendrítico y los principales cuerpos de agua en el AI-A (Elaborado con datos del Programa Estatal de Ordenamiento Territorial, 1991).

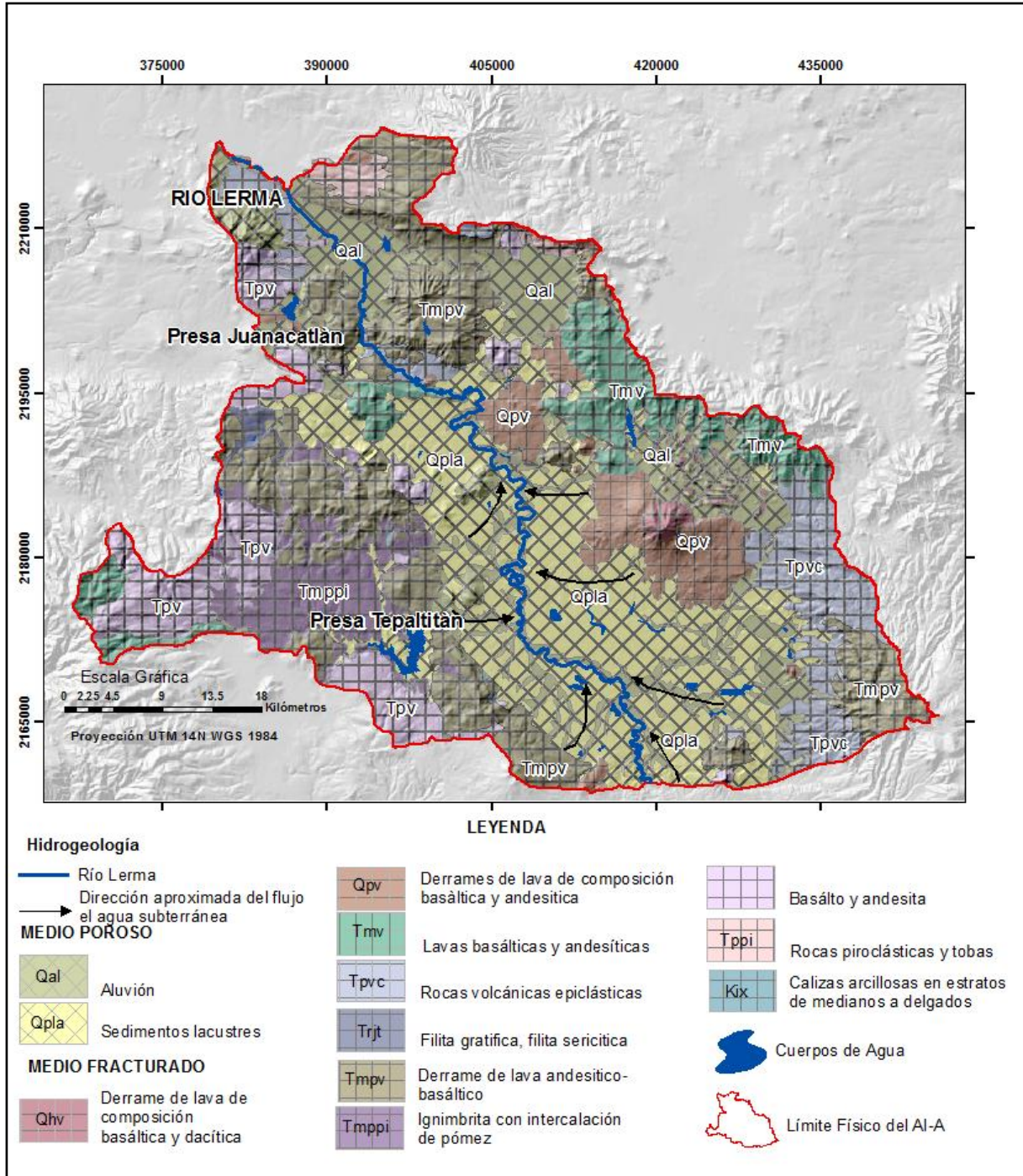


Figura 2.9 Mapa hidrogeológico del AI-A (Elaborado con datos del IFOMEGEM, 1994).

# Capítulo 3

## Marco teórico conceptual

### 3.1 CONCEPTUALIZACIÓN

**Abatimiento.-** Se refiere a la reducción del nivel del agua en un pozo debido a una extracción sostenida. El abatimiento es una función de las propiedades del acuífero (conductividad hidráulica,  $K$ ) y las características del pozo incluyendo su construcción. Se utiliza para estimar las propiedades de los acuíferos en ausencia de pruebas sistemáticas (PUERTO DRNA, 2012).

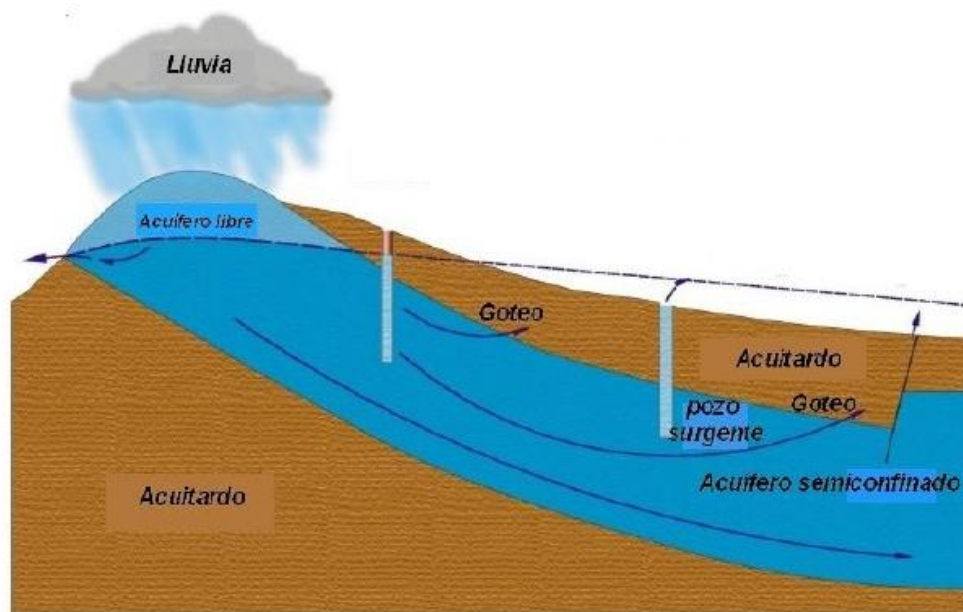
**Acuífero.-** se le denomina acuífero a cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (CONAGUA, 2014).

**Acuífero sobreexplotado.-** Es aquel en el que la extracción del agua subterránea supera al volumen de recarga media anual, de tal forma que la persistencia de esta condición por largos periodos de tiempo ocasiona alguno o varios de los siguientes impactos ambientales: agotamiento o desaparición de manantiales, lagos, humedales; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; intrusión marina en acuíferos costeros; migración de agua de mala calidad. Estos impactos pueden ocasionar pérdidas económicas a los usuarios y a la sociedad (CONAGUA, 2014).

**Acuífero semiconfinado.-** Este tipo de acuífero corresponde a situaciones similares a las que presentan los acuíferos confinados pero con la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo, en lugar de a un acuífugo o acuicludo. Por lo tanto, los acuíferos semiconfinados pueden recibir una cierta recarga, también llamada goteo, a través de la capa semipermeable que los confina (Molinero, 2005). Figura 3.1

**Agua subterránea.-** Es el agua que satura por completo los poros o intersticios del subsuelo. Por lo tanto es aquella que constituye la zona saturada (CONAGUA, 2014).

**Cuenca Hidrológica.-** Es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas –aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos (CONAGUA, 2014).



**Figura 3.1** Esquema ilustrativo del sistema hidrogeológico de un acuífero semiconfinado (Molinero, 2005).

**Comisión Nacional del Agua.-** Órgano Administrativo Desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, con funciones de Derecho Público en materia de gestión de las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, con autonomía técnica, ejecutiva, administrativa, presupuestal y de gestión, para la consecución de su objeto, la realización de sus funciones y la emisión de los actos de autoridad que conforme a esta Ley corresponde tanto a ésta como a los órganos de autoridad a que la misma se refiere (Ley de aguas nacionales, 2012).

**Desarrollo sustentable.-** En materia de recursos hídricos, es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter hídrico, económico, social y ambiental, que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se fundamenta en las medidas necesarias para la preservación del equilibrio hidrológico, el aprovechamiento y protección de los recursos hídricos, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de agua de las generaciones futuras (CONAGUA, 2014).

**Descarga.-** Es la acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor (CONAGUA, 2014).

**Disponibilidad media anual de agua subterráneas.-** Es el volumen medio anual de agua subterránea que puede ser concesionada para ser extraída de una unidad hidrogeológica o acuífero para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (CONAGUA,2014).

**Explotación.-** Es la utilización del agua en actividades encaminadas a extraer elementos químicos u orgánicos disueltos en la misma, después de las cuales es retornada a su fuente original sin consumo significativo (CONAGUA, 2014).

**Flujo del agua subterránea.-** Es la dirección que sigue el agua subterránea debido al gradiente subterráneo (INEGI, 2009).

**Gasto.-** Es el volumen de agua por unidad de tiempo (INEGI, 2009).

**Nivel piezométrico.-** Es el nivel al que asciende el agua de un determinado acuífero cuando se mide con un piezómetro (Glosario hidrogeológico internacional UNESCO, 2012).

**Pozo.-** Es una perforación vertical realizada con maquinaria, para la obtención de fluidos (INEGI, 2009).

**Piezómetro.-** Pozo cuya rejilla está situada a una determinada profundidad del acuífero, que sirve para medir variables hidrogeológicas y químicas (Glosario hidrogeológico internacional UNESCO, 2012).

**Reúso.-** Es la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales con o sin tratamiento previo (CONAGUA, 2014).

**Región hidrológica.-** Área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos, cuya finalidad es el agrupamiento y la sistematización de la información, análisis, diagnóstico y acciones en relación con la ocurrencia del agua en cantidad y calidad, así como su explotación uso o aprovechamiento (Ley de aguas nacionales, 2012).

**Uso.-** Es la actividad a la que se destina el agua (CONAGUA, 2012).

**Uso del agua.-** Se define como la aplicación del agua a una actividad (Estadísticas del agua en México, 2010).

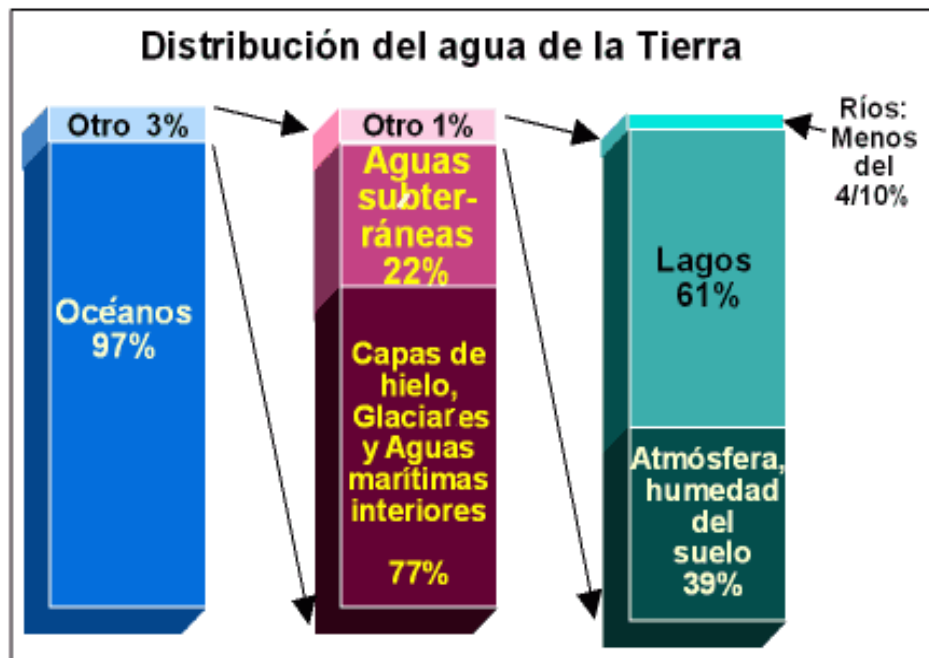
**Uso Agrícola.-** Es el agua destinada para el riego de la producción de alimentos forrajeros y consumo humano (CONAGUA, 2012).

**Uso Público-Urbano.-** Es el agua ocupada para los centros de población y asentamientos urbanos, a través de la red municipal (CONAGUA, 2012).

**Uso Consuntivo.-** Es el volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga (CONAGUA, 2012).

### 3.2 EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL CONTEXTO MUNDIAL.

A nivel mundial se estima la disponibilidad de agua promedio anual en 1,386 millones de kilómetros cúbicos. De ésta, 35 millones de kilómetros cúbicos son agua dulce (el 2.5%). Del agua dulce, el 70% no son disponibles por encontrarse en glaciares, nieve, hielo; 10.5 millones de kilómetros cúbicos se encuentran en el agua subterránea, y solamente 135 mil kilómetros se encuentran en lagos, ríos, humedad en suelo y aire, humedales, plantas y animales (Figura 3.2). Dentro del ciclo hidrológico, la precipitación pluvial es parte importante, debido a que produce el agua renovable del planeta y ésta varía dependiendo de la región. (CONAGUA, 2010).



**Figura 3. 2** Distribución del Agua en el Mundo (Fuente: USGS, 2010).

A lo largo de todo el siglo pasado ha aumentado la utilización de las aguas subterráneas en todo el mundo tanto para abastecimiento urbano como para el riego, en particular en la segunda mitad del siglo. Algunas de las ciudades más pobladas del mundo se abastecen mayoritariamente con aguas subterráneas. Entre ellas están México, Calcuta, Shanghái, Buenos Aires, Dhaka, Manila, Pekín, París y Londres (Sahuaquillo *et al*, 2006). En los países desarrollados la utilización del agua subterránea para usos urbanos es muy importante, siendo superior al 70% en muchos países de Europa. Es casi el 100% en Dinamarca y supera al 50% en los Estados Unidos.

El riego con aguas subterráneas supera el 50% en la mayoría de los estados del Oeste de EE.UU. En España se riegan con ellas un millón de hectáreas y suponen del orden del 20% del agua aplicada. En el Sureste de Asia, el norte de China y otros países, entre los que está México, se ha producido un aumento espectacular del riego con aguas subterráneas (Burke, 2003), en un proceso que se ha denominado como revolución silenciosa (Llamas 2005; Llamas y Martínez Santos 2005; Fornés *et al* 2005) por haberse realizado por los agricultores pobres de esos países, sin apenas control ni ayuda técnica de las agencias de agua, ni subvenciones del estado o de organismos estatales. El agua subterránea es barata, fácilmente accesible y vital para dos mil millones de personas en todo el mundo (Sahuaquillo *et al*, 2006).

Las aportaciones del ciclo hidrológico no ofrecen garantías a la humanidad, ya que únicamente dos tercios de la población mundial viven en zonas que reciben una cuarta parte de las precipitaciones anuales del mundo. Por ejemplo, un 20% de la escorrentía media mundial por año corresponde a la cuenca amazónica, una vasta región con menos de 15 millones de habitantes, o sea, una minúscula fracción de la población mundial. De manera similar, el río Congo y sus tributarios representan un 30% de la escorrentía anual del continente africano, pero esa cuenca hidrográfica contiene sólo 10% de la población de África (PNUMA, 2010).

Más de la mitad de la escorrentía global tiene lugar en Asia y Sudamérica (31% y 25%, respectivamente). Pero si se considera la disponibilidad per cápita, Norteamérica tiene la mayor cantidad de agua dulce disponible, con más de 19,000 metros cúbicos per cápita por



año. En cambio, la cantidad per cápita es apenas superior a 4,700 metros cúbicos (incluido el Medio Oriente) en Asia (PNUMA, 2010).

Las aguas subterráneas aportan en España entre un 25 y un 35 por ciento de los volúmenes destinados a abastecimiento urbano. Una parte de este suministro tiene amenazada su sostenibilidad por problemas de sobreexplotación o salinización que afectan a los acuíferos captados. Según el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (MINER-MOPTMA, 1994), el volumen de aguas subterráneas destinado al abastecimiento de poblaciones, en las distintas cuencas hidrográficas de España, alcanzaría 1.080 hm<sup>3</sup>/año, un 25 por ciento del volumen total de agua aplicado a dicho fin (4.305 hm<sup>3</sup>/año, según la Memoria del proyecto de Plan Hidrológico Nacional). Fernández (2008).

América Latina es sin duda una región codiciada por el resto del mundo por sus riquezas naturales. De ellas la más codiciada es el Acuífero Guaraní por ser la tercera reserva de agua a nivel mundial más grande. Este Acuífero es el tercer más grande reservorio de agua subterránea del mundo y que tiene una extensión un poco mayor a la equivalente a los territorios de Portugal, España y Francia juntas y ocupan los territorios de Brasil (9,9% de su territorio), Argentina (7,8%), Paraguay (17,2%) y Uruguay (25,5%). (Simone Graf Rey, 2005).

### **3.3 EL AGUA SUBTERRÁNEA EN MÉXICO**

En México la perforación de los primeros pozos en 1847 dan inicio a la historia del uso del agua subterránea, dejando las norias cavadas a mano dentro de un tiempo romántico de la extracción de agua. Los pozos cambiaron no sólo la forma en cómo la naturaleza proveía el elemento, sino que debido al enorme caudal de extracción que involucra, surgieron una serie de consecuencias ambientales negativas como resultado de la ausencia del conocimiento necesario para evaluar lo que implica la extracción de agua subterránea y del cómo ésta se encuentra ligada con otros componentes del ambiente (Domínguez *et al*, 2007). Posteriormente en 1972 la problemática de abastecimiento de agua en el país y en el valle de México

era crítico. En esta región se observaba una altísima tasa de crecimiento poblacional, así como un hundimiento acelerado de sus suelos (Gobierno del Estado de México. 2007).

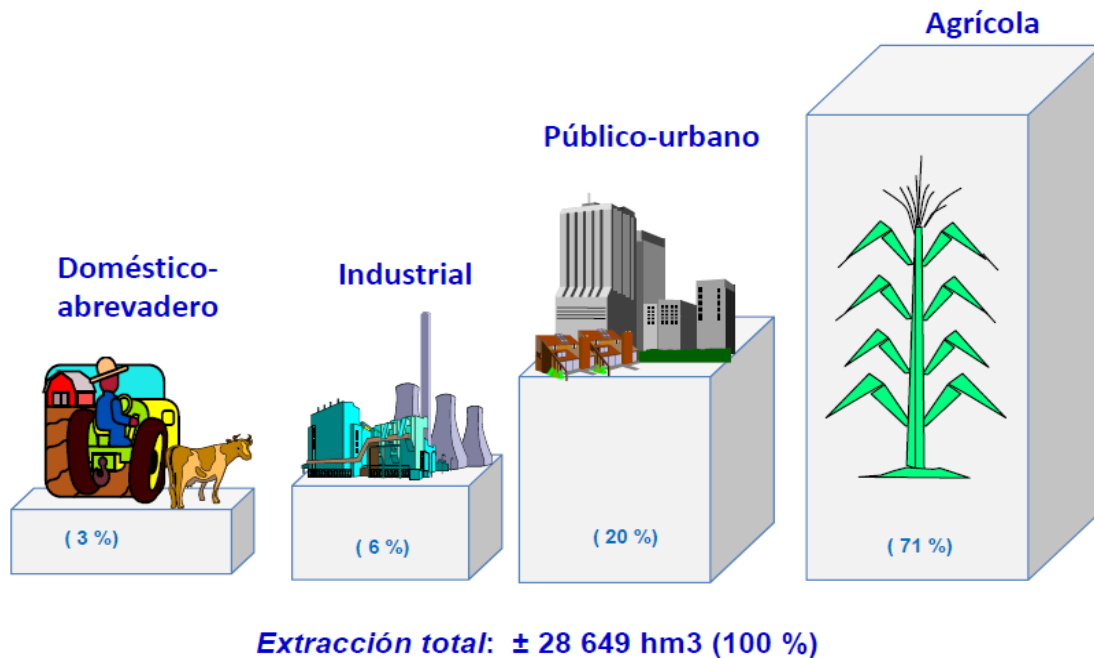
En México llueve una media de 1,489 km<sup>3</sup> al año, de los cuales se evapotranspira el 73.1% regresando a la atmósfera, el 22.1% escurre por ríos y arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con países vecinos, así como la recarga incidental (consecuencia de la actividad humana, sin estructura específica para recarga artificial), anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2010).

Se han identificado (CONAGUA, INEGI) 1,471 cuencas hidrográficas, que para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas. Para el 31 de diciembre del 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas (731 a diciembre de 2010). Las cuencas se agrupan en 37 regiones hidrológicas, éstas a su vez en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). El país está dividido en 653 acuíferos. La medición del ciclo hidrológico la lleva al cabo CONAGUA con 4,008 estaciones hidrométricas y climatológicas (CONAGUA, 2010).

En México, el agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo en el país, en más del 50% del territorio Mexicano prevalecen los climas secos y semisecos. Actualmente se extrae del subsuelo 28 millones de m<sup>3</sup>/año 653 acuíferos, con la siguiente distribución por usos (figura 3.3): cerca del 71% se destina a la agricultura, el 20% abasto de las zonas urbanas, el 6% para la actividad industrial y 3% es destinada para uso doméstico (Arreguín *et al.*, 2007).

El agua subterránea proporciona el 37% del volumen total concesionado para usos consuntivos. De los 653 acuíferos en que está subdividido el país, a diciembre de 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 282 acuíferos (403 a diciembre de 2010). Se consideran sobreexplotados los acuíferos cuya extracción es mayor que su recarga total en un periodo determinado, en esta condición para el año 2009 se tenían 100 acuíferos, de los cuales se extrae el 53.6% para todos los usos.

## Extracción y usos del agua subterránea en México



**Figura 3.3** Diagrama ilustrativo donde se muestra la extracción y usos del agua en México (Arreguin, 2011).

Dieciséis acuíferos en zonas costeras presentan fenómenos de intrusión marina y 32 se encuentran bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres (CONAGUA, 2010).

En el Estado de México, incluyendo la denominada Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se tienen identificados 9 acuíferos, y de acuerdo al informe de la CONAGUA, seis de ellos se encuentran sobreexplotados, con la siguiente condición: el acuífero de Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 347.5%; Texcoco, 90.32%; Cuautitlán-Pachuca, 47.5%; Ixtlahuaca- Atlacomulco, 75%; Chalco-Amecameca, 22.1%, y Valle de Toluca, 25% (Korenfeld *et al.*, 2011)..

### **3.4 SOBREEXPLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO IXTLAHUACA-ATLACOMULCO.**

EL AI-A, es uno de los acuíferos del Alto Lerma que abastece de agua potable a la ciudad de México, desde hace algunas décadas, constituye una de las fuentes externas de mayor relevancia en el suministro de agua subterránea de gran calidad para la zona metropolitana. Desde el año de 1949, se inició la captación de los manantiales de varias de las zonas del estado de México, así como la explotación de los acuíferos mediante pozos profundos y se construyó el túnel de Atarasquillo, para que, en 1951, abastecieran a la ciudad de México con un volumen de 4 metros cúbicos por segundo. Así, en 1981, se extraían del acuífero I-A 190 millones de metros cúbicos ( $m^3$ ), lo que ocasionó depresiones de 0.5 a 1 m, provocadas por el bombeo de las baterías de los pozos del Departamento del Distrito Federal (DDF), en la porción central del valle, donde confluye el agua subterránea; la profundidad al nivel estático oscilaba entre 20 y 100 m.

En 1988, la batería de pozos de agua potable del Distrito Federal, habían disminuido su caudal, con el fin de recuperar los niveles piezométricos originales, ya que se observó un abatimiento al poniente de Ixtlahuaca; con estas medidas y con la infiltración de fugas y retornos de riego, se recuperaron los niveles del agua subterránea en el valle de Ixtlahuaca. Tres años después, en 1991, la recarga total del acuífero era de  $32 m^3$  y existía recuperación, producto de la disminución del bombeo y como respuesta del volumen aportado por las entradas subterráneas en la región (CONAGUA, 2009). Sin embargo a pesar de cierta recuperación continua la sobreexplotación, los datos del Diario Oficial de la Federación (DOF) en el año 2009 indican que la extracción es superior a la de la recarga, ya que se extraen 208 millones de metros cúbicos por año y la recarga es solo de 119 millones de metros cúbicos por año.

# Capítulo 4

## Marco Metodológico

Para analizar la evolución espacial y temporal de la sobreexplotación del acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco se utilizó la siguiente metodología, con el propósito de cumplir con los objetivos planteados en la presente investigación. El esquema del proceso metodológico se muestra en la figura 4.1

### **4.1.- RECOPIACIÓN, ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE RELACIONADA CON EL ÁREA Y TEMÁTICA DE ESTUDIO.**

En los organismos académicos se recopiló e íntegro toda la información disponible sobre el tema, tales como: Universidad Autónoma del Estado de México, (UAEMéx), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como instituciones gubernamentales: Instituto Nacional de Estadística Geografía (INEGI), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional de Agua (CNA), Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGECEM).

Se obtuvo información de las características hidrogeológicas del acuífero, y su evolución tanto espacial como temporal de los niveles piezométricos. Además se tomó en cuenta la distribución espacial de los pozos de explotación y la evolución de los principales efectos ambientales relacionados también con el crecimiento urbano. Una vez que se contó con la información disponible se procedió a su análisis, se sintetizó la información más confiable y se descartó aquella que no cumplió con las necesidades requeridas para esta investigación, para finalmente contar con un diagnóstico actual de la funcionalidad de los multipiezómetros del área.

Una vez obtenida toda la información necesaria, se procedió a estandarizarla, se convirtieron de coordenadas geográficas a UTM (zona 14 norte), y se cambió de Datum NAD 1927 a WGS 1984, que son las que corresponden al área de estudio. A través de esto se pudieron obtener las diferentes capas de interés, las cuales permitieron el análisis, captura y manejo de la información requerida para la integración en el sistema de información geográfica

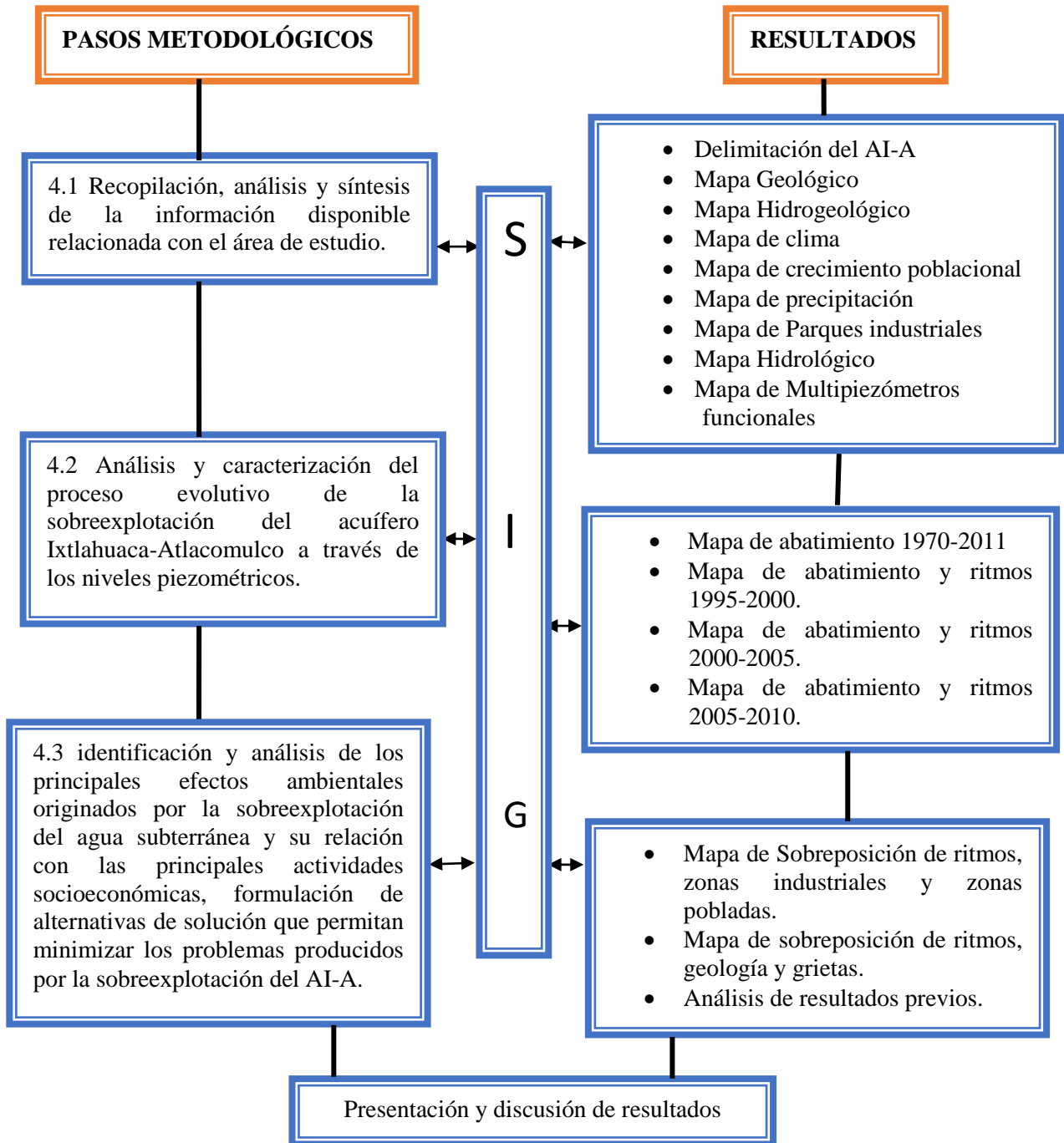


Figura 4. 1 Esquema metodológico para el desarrollo del trabajo investigativo

#### **4.1.1 DELIMITACIÓN DEL ACUÍFERO IXTLAHUACA-ATLACOMULCO.**

La cartografía base fue obtenida del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del cual se hizo uso de las cartas topográficas digitales escala 1:50,000 con claves E14A16, E14A17, E14A26 E14A27, E14A28, F14C86, F14C87, además de esta instancia se obtuvieron los datos vectoriales tales como: división política de la República Mexicana y del Estado de México, además de los AGEB's (Áreas Geo-Estadísticas Básicas, 2010) que comprenden el área de estudio.

Mediante las curvas de nivel y el modelo digital de elevación (MDE) escala 1:50,000 se pudieron delimitar los puntos de mayor elevación, esto para trazar el límite físico del Acuífero. (Parte aguas de la cuenca). Para la delimitación del acuífero se tomó como referencia el límite administrativo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2009), pero este ha sufrido diferentes modificaciones en lo que respecta a su delimitación, es por esto la necesidad de utilizar el límite físico en este caso y no el administrativo.

Obtenido ya el límite del área de estudio, se procedió a la realización de los mapas físicos: clima, precipitación e hidrología superficial, esta información se obtuvo del programa estatal de ordenamiento territorial, los shapfiles utilizados se descargaron del portal de geoinformación de CONABIO.

#### **4.1.2 OBTENCIÓN DEL MAPA GEOLÓGICO E HIDROGELÓGICO.**

Para la obtención del mapa geológico, se utilizaron las cartas geológicas que comprenden el área de estudio escala 1:50,000 (INEGI e IFOMEGEM 1994), las cuales se obtuvieron de forma análoga, por lo cual se tuvieron que georeferenciar, digitalizar y editar.

El mapa Geohidrológico se realizó tomando en cuenta la misma información que el geológico, solo que en este fue necesario agrupar las distintas formaciones rocosas en dos grupos: las fracturadas y las porosas (UNITECNIA, 1996).

### **4.1.3 COMPILACIÓN DE DATOS DEMOGRÁFICOS.**

La información requerida se obtuvo a través de los censos de población 1990-2010 y el conteo de población 2005, de los cuales se obtuvo la población total de cada uno de los municipios que comprenden el área de estudio.

Para obtener la información referente a los parques y zonas Industriales se recurrió al FIDEIPAR (Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales en el Estado de México), de esta se obtuvieron las zonas industriales que se localizan dentro del acuífero, así como la información referente a cada una de estas. Por otra parte para la localización espacial de dichas áreas se procedió a ubicarlas en el “SIE” (El Sistema de Información Estratégico para la Inversión de Negocios en el Sector Industrial del Estado de México), Posteriormente se procedió a localizarlas dentro de los planes de desarrollo urbano de los municipios en los que están situadas estas zonas, georeferenciando y digitalizando cada una de las zonas industriales. Para la realización del mapa de población total de habitantes por municipio se utilizaron datos del INEGI de los años 1900, 1995, 2000, 2005. De estos datos se procedió a la realización del mapa temático.

### **4.1.4 LOCALIZACIÓN DE LOS MULTIPIEZÓMETROS DEL ACUÍFERO IXTLAHUACA-ATLACOMULCO**

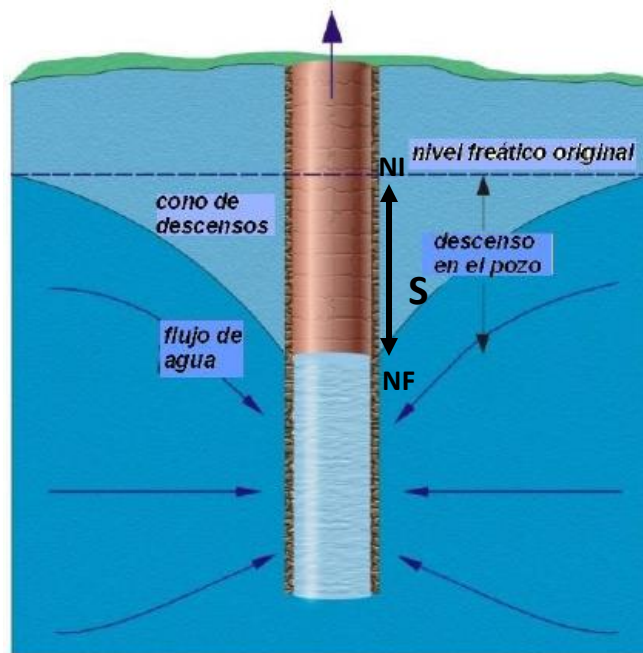
La localización de los multipiezómetros que corresponden al área de estudio, se obtuvo de la base de datos de CONAGUA (2009), de la cual correspondían 32 multipiezómetros al acuífero, pero algunos presentaban ausencia de datos, por tal motivo se tuvieron que tomar solo 27 multipiezómetros.



#### 4.2.- ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO EVOLUTIVO DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO IXTLAHUACA-ATLACOMULCO A TRAVÉS DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS.

A fin de analizar la distribución piezométrica y su evolución en el área de estudio, se generaron mapas donde se muestra la distribución de la carga hidráulica observada en el periodo 1970-2010 en intervalos que representan adecuadamente la variabilidad temporal del nivel del agua. La información necesaria se tomó de la base de datos de la CNA, relacionada con la piezometría del acuífero.

Para la selección de los valores del nivel del agua subterránea se tomaron los multipiezómetros que tuvieran una profundidad entre 100 y 150 m. los cuales correspondían a las sondas I,II,III, esto siempre y cuando no tuvieran sobresaltos en los datos, esto quiere decir que tuvieran una secuencia de un ritmo lógico y coherente. Cabe mencionar que en algunos casos se tomaron sondas de menor profundidad debido a la ausencia de datos en los rangos establecidos. Los rangos de profundidad que se tomaron son debido a que en esa distancia los pozos presentan una mayor sobreexplotación.



**Figura 4.2.** Esquema ilustrativo del cono de descenso (Abatimiento) de un pozo perforado producido al bombear agua. (Moliner, 2005)

Para el cálculo de los abatimientos (figura 4.2) de los niveles de agua subterránea se tomaron los datos históricos de los niveles de los multipiezómetros situados en el área de estudio. La zona de estudio cuenta con 32 multipiezómetros, de los cuales solo se tomaron 27, para los que se analizó el periodo 1970-2010, para esto fue necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$S=Ni-Nf \dots\dots\dots (1)$$

Dónde:

S= Abatimiento del nivel del agua subterránea (m)

Ni= Nivel del agua subterránea del año inicial (m)

Nf= Nivel del agua subterránea del año final (m)

De acuerdo a esta ecuación los datos que presenten un signo negativo (-), significa que sufren abatimiento, de ser el caso contrario (+) los multipiezómetros mostrarían una recuperación.

Para realizar las isolneas de abatimiento de los niveles de agua del periodo 1970-2011, se utilizó el método de triangulación, mediante este método se realizó la interpolación de isolneas de los niveles de agua subterránea con valores que van desde los 5m, hasta los 40 m. la elección de los intervalos se hizo con la finalidad de obtener zonas de mayor o menor variabilidad de abatimientos y de esta manera poder representarlos de forma cartográfica en el caso de los periodos 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010 se tomaron valores desde 1m, hasta los 6m.

De este análisis se derivó la cartografía que muestra las áreas donde se presentan mayores problemas de descensos de agua subterránea y su relación con la localización de grietas en el área de estudio en los siguientes periodos:

El cálculo de la tasa anual de abatimientos en los siguientes periodos (1995-2000, 2000-2005, 2005-2010) se dividió el valor del abatimiento entre el número de años de cada uno de los periodos, que en este caso fue de 5 años. El cual se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$TA = S / Na \dots\dots\dots (2)$$

Dónde:

S= Abatimiento del nivel del agua subterránea (m)

Na= Número de años del periodo evaluado

TA= Tasa anual (m/año)

Debido a las necesidades de esta investigación se sobrepusieron los mapas de ritmos y abatimientos con las variables socioeconómicas y físicas. Esto permitió el análisis de estas variables y los posibles impactos que se pueden suscitar debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, de esta manera se identificaron las áreas que necesitan mayor prioridad de gestión, estableciéndose así la evolución espacial y temporal de la sobreexplotación del acuífero.

De este análisis se derivó la cartografía, que indica en el periodo evaluado aquellos sectores en los que han sido más marcados los efectos de la sobreexplotación, así como localizar las áreas que han tenido mayor descenso de niveles del agua, o por el contrario, áreas donde dichos niveles se han recuperado.

**4.3.-IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES EFECTOS AMBIENTALES ORIGINADOS POR LA SOBREEXPLORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU RELACIÓN CON LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS.**

Una vez que se estableció la evolución espacial y temporal del proceso de sobreexplotación del acuífero reflejado en la distribución de su piezometría, se llevó a cabo la localización de las grietas de acuerdo a la información proporcionada por CONAGUA, se realizó además la sobreposición de las tasas anuales y abatimientos con las variables físicas y sociales.

Finalmente se determinó la relación existente entre la evolución de estas variables y la evolución de la piezometría del acuífero (indicador de la sobreexplotación) para determinar la influencia de cada una de éstas en el proceso de sobreexplotación

Para la elaboración del pronóstico prospectivo para el año 2030, se procedió a multiplicar el ritmo del último periodo (2005-2010) por 20, que es la diferencia entre el año 2010 y 2030. El motivo por el cual se tomó el año 2030, es porque durante estos años (20) los daños físicos (subsidiencias) serían más visible que en un periodo menor.

#### **4.4.-INTEGRACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN.**

Durante todo el proceso metodológico se utilizaron los Sistemas de Información Geográfica (SIG) utilizando el programa ARCGIS 10.1 el cual fue fundamental para la elaboración de la cartografía, para la realización de la base de datos, para la captura de información, así como el manejo, análisis, procesamiento, obtención de resultados y presentación.

En este proceso se integró toda la información resultante sobrepuesta de las diferentes variables geográficas, esto permitió realizar un diagnóstico de la problemática producida por el proceso de sobreexplotación del agua subterránea del acuífero, lo cual facilito la identificación de las áreas de mayor atención a la protección de la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo, con esto se pudieron identificar las áreas más propensas a sufrir efectos ambientales negativos tales como son los agrietamientos o subsidiencias del terreno. Este análisis permitió generar alternativas de solución que ayuden a minimizar los problemas producidos por este proceso.

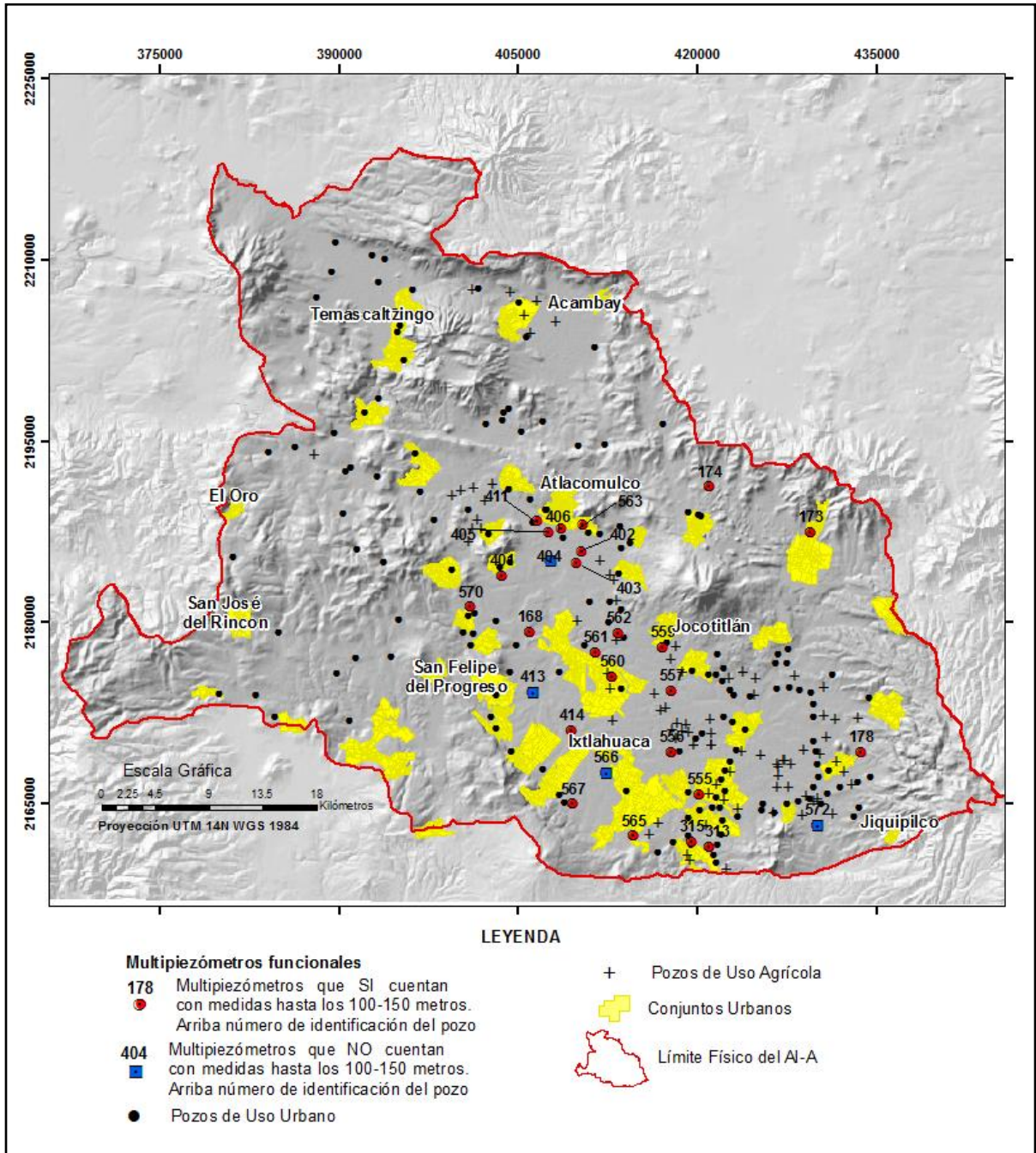
# Capítulo 5

## Resultados y Discusión

### **5.1 ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD DE LOS MULTIPIEZÓMETROS DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

Una vez analizada la información proporcionada por CONAGUA (2009) se obtuvo un mapa donde se refleja el diagnóstico de la funcionalidad de los multipiezómetros del área de estudio, el cual se muestra en la Figura 5.1

El motivo por el cual se realizó este mapa es debido a que algunos multipiezómetros no contaban con datos o presentaban problemas en los registros (Tabla 5.1), ya sea porque estaban tapados, tenían abejas, presentaban derrumbes o estaban en reparación.



**Figura 5.1** Representación en el área de estudio de los multipiezómetros de acuerdo a su grado de funcionalidad (Con base en CONAGUA 2010).

**Tabla 5.1** Número de multipiezómetros, cuales funcionan y cuales no tienen registro en las mediciones hasta los 100-150m. de profundidad y su causa (Con base en CONAGUA).

No.	Multipiezómetros	Municipio	Profundidad (m)	Funcionalidad	
PL-173	San Bartolo Morelos	San Bartolo Morelos	150	Si	
PL-174	Maxda-yondeje	Timilpan	150	Si	
PL-178	San Bartolo Oxtotitlán	Jiquipilco	150	Si	
PL-313	Km. 33 Carr. Tol-Qro	Ixtlahuaca	150	Si	
PL-315	Cerca de la bomba pozo	Ixtlahuaca	132	Si	
PL-401	Poblado del Tunal	Jocotitlán	150	Si	
PL-402	Rancho Cotecito	Atlacomulco	150	Si	
PL-403	Ejido Caspi	Atlacomulco	150	Si	
PL-404	El Río Abejas	Atlacomulco	66	No	Tapón y Abejas
PL-405	Rancho las Mercedes	Atlacomulco	150	Si	
PL-406-1	Máquina Perforadora	Atlacomulco	150	Si	
PL-411	Cruce Río Lerma	Atlacomulco	150	Si	
PL-413	San José de la Venta	San Felipe del Progreso	66	No	Fluye
PL-414	San Antonio del Río	Ixtlahuaca	150	Si	
PL-555	San Bartolo del llano	Ixtlahuaca	132	Si	
PL-556	Las Torres subestación	Ixtlahuaca	150	Si	
PL-557	Industrias Pasteje	Jocotitlán	150	Si	
PL-559	Sta Clara Microhondas	Jocotitlán	150	Si	
PL-560	Km. 3 camino san pedro	Ixtlahuaca	132	Si	
PL-561	San José Villeje	Jocotitlán	150	Si	
PL-562	Mavoro km. 116+600	Jocotitlán	150	Si	
PL-563	Tecuác, Km 2+400	Atlacomulco	132	Si	
PL-565	Ejido del Rincón	Ixtlahuaca	150	Si	
PL-566	Rancho Vaquerias	Ixtlahuaca	66	No	Tapón y sin datos
PL-567	San Andrés del Pedregal	San Felipe del Progreso	150	Si	
PL-570	K 8+350	Jocotitlán	150	Si	
PL-572	Ejido Mañi	Jiquipilco	66	No	Extrangulada

Nota:

- Extrangulada: se refiere a un desperfecto en el piezómetro, que no permite el paso de la sonda de medición.
- Fluye: El agua fluye a la superficie del terreno.

## **5.2 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL ABATIMIENTO DEL NIVEL DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL PERIODO 1970-2010.**

Los resultados de los descensos de los niveles de agua subterránea para el periodo 1970-2010 se refleja en la tabla 5.2 y pueden observarse en la figura 5.2. Los abatimientos mayores a 5 metros se localizan en la región centro y sur del área, estos abatimientos para el periodo alcanzan hasta los 40.57 m. para el multipiezómetro 178. Localizado en el extremo Sur-Este del acuífero. Otro de los que presenta abatimientos similares es el multipiezómetro 174 con valores de 37.71 m. situado en la región este del acuífero. Por otra parte, el multipiezómetro 559 presenta un valor poco menor a los anteriores, siendo este de 24.06 m. el cual se encuentra localizado en la zona Centro-Este del área.

Los mayores abatimientos se localizan en regiones de los municipios de Jocotitlán e Ixtlahuaca, específicamente en la comunidad de Maboro, donde se destacan descensos del orden de 20 y hasta 30 m. de abatimiento, situados estos en la zona Centro-Este del acuífero.

En esta región existe una alta concentración de pozos de explotación principalmente de uso agrícola, considerando que el terreno es material detrítico, específicamente material lacustre y es relativamente poroso es susceptible a hundimientos y agrietamientos, por lo que es un área que se tiene que monitorear continuamente para evitar en un futuro posibles riesgos potenciales al medio físico y antrópico.



**Tabla 5.2** Abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 1970-2010 (con base en CONAGUA)

No. de Piezómetro	Coordenadas		Niveles (m)		
	Latitud (x)	Longitud (y)	1970	2010	Abatimiento
PL-173	-99,673	19,7819	43.98	43.93	0.05
PL-174	-99,7541	19,8153	18.52	56.23	-37.71
PL-178	-99,6316	19,6178	19.60	60.17	-40.57
PL-313	-99,7525	19,5466	28.10	42.08	-13.98
PL-315	-99,7672	19,55	8.11	11.61	-3.50
PL-401	-99,9191	19,7483	18.56	25.66	-7.10
PL-402	-99,8561	19,7663	4.10	10.97	-6.87
PL-403	-99,8597	19,7575	0.03	5.91	-5.88
PL-404	-99,8805	19,76	-0.34	0.76	-1.10
PL-405	-99,8825	19,7808	4.07	9.03	-4.96
PL-406-1	-99,8705	19,7786	9.49	8.91	0.58
PL-411	-99,8908	19,7894	3.39	10.91	-7.52
PL-413	-99,8947	19,6616	Fluye	Fluye	Fluye
PL-414	-99,8633	19,6328	8.92	10.81	-1.89
PL-555	-99,7611	19,5856	23.09	26.42	-3.33
PL-556	-99,783	19,6172	7.48	11.66	-4.18
PL-557	-99,7833	19,6627	20.95	34.62	-13.67
PL-559	-99,7908	19,6955	38.75	62.81	-24.06
PL-560	-99,8313	19,6733	14.86	29.30	-14.44
PL-561	-99,8438	19,6911	1.41	0.96	0.45
PL-562	-99,8258	19,7058	29.83	48.91	-19.08
PL-563	-99,8547	19,7869	22.34	27.81	-5.47
PL-565	-99,8133	19,5544	20.04	27.51	-7.47
PL-566	-99,8352	19,6016	9.24	6.71	2.53
PL-567	-99,8619	19,5778	16.60	24.52	-7.92
PL-570	-99,9441	19,7247	29.85	31.03	-1.18
PL-572	-99,6672	19,563	17.55	25.61	-8.06

Nota: Fluye.- El agua fluye a la superficie del terreno.

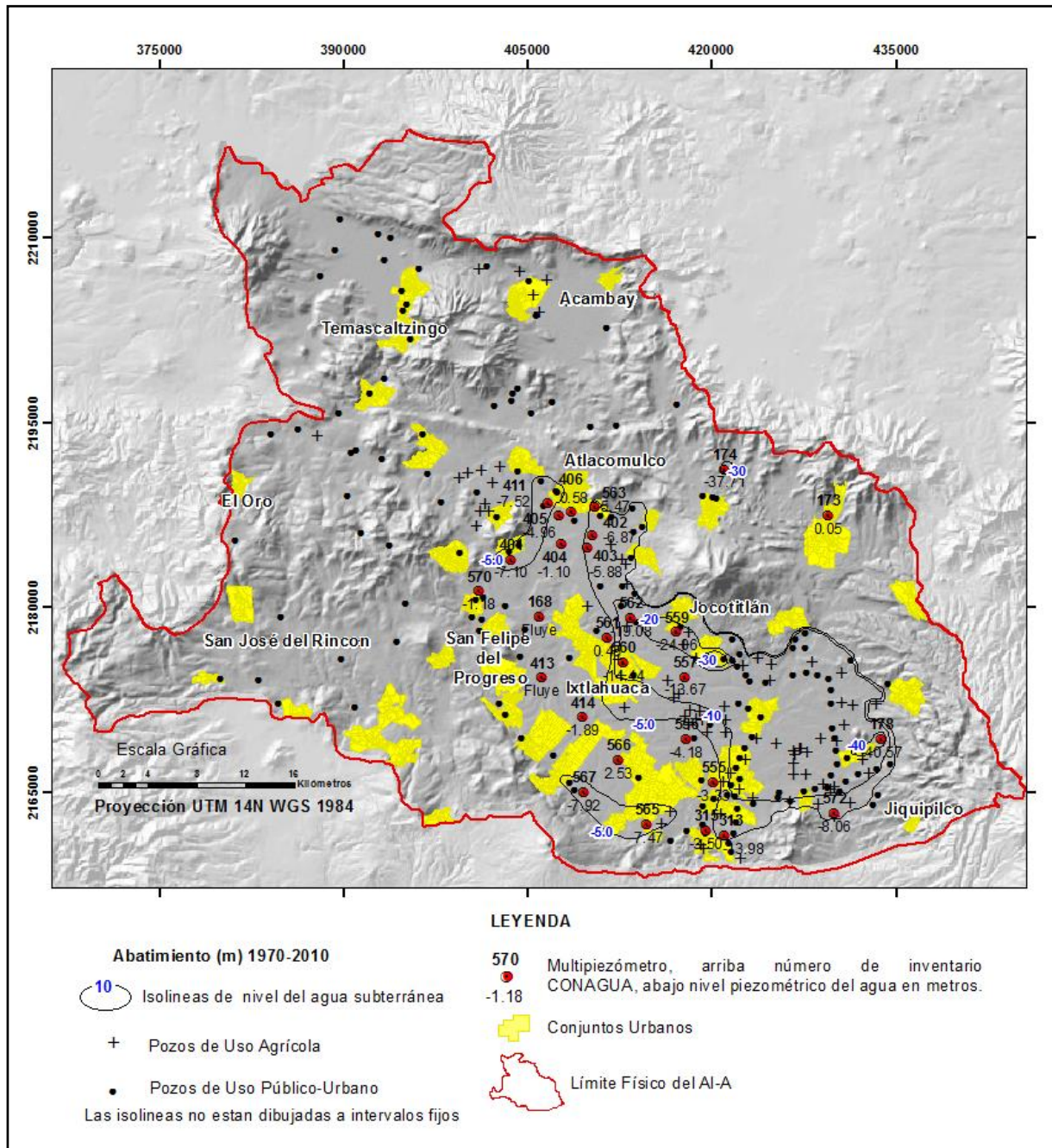


Figura 5.2 Isolíneas de abatimiento del AI-A para el periodo 1970-2010 (Con base en CONAGUA, 2010)

### **5.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS TASAS DE ABATIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA LOS PERIODOS 1995-2000, 2000-2005 Y 2005-2010.**

En el periodo 1995-2000 los descensos de los niveles piezométricos se muestran en la tabla 5.3 y se pueden observar en la figura 5.3. Los abatimientos mayores a 4 metros se localizan en la zona centro del área. Para este periodo las abatimientos alcanzan 4.92 m., esto para el multipiezómetro 174. Localizado en la región este del acuífero. Otro de los piezómetros que presentan descenso en su piezometría es el multipiezómetro 562 con valor de 4.84 m, situado este en la región centro del acuífero, de manera similar el multipiezómetro 559 presenta las mismas características al anterior.

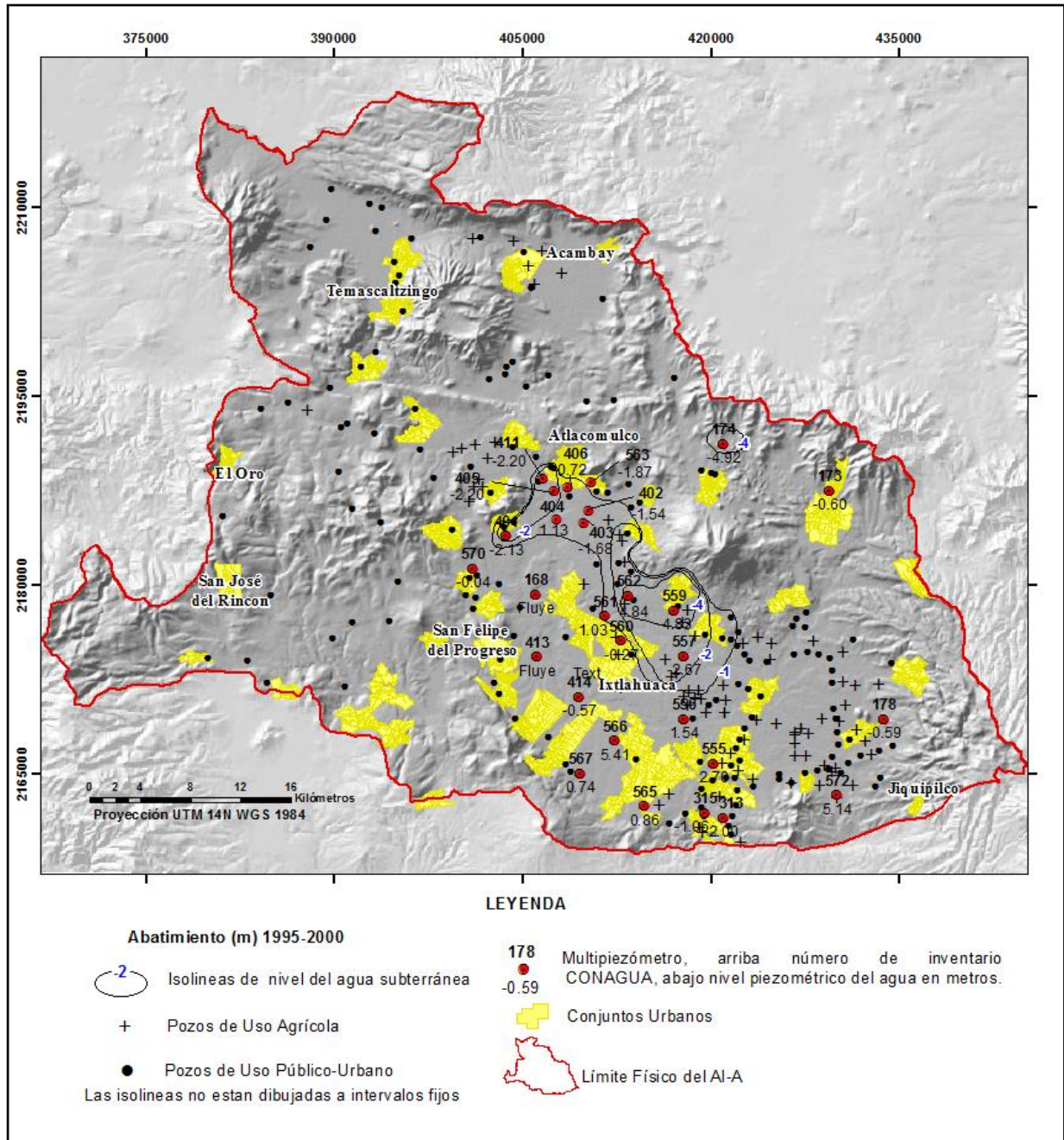
Los mayores abatimientos se localizan en regiones de los municipios de Jocotitlán, Ixtlahuaca y Atlacomulco, específicamente en la comunidad de Maboro y Xocotitlán, donde destacan descensos del orden de 4 m. situados estos en el área centro del acuífero. Esta región presenta una alta concentración de pozos de explotación principalmente de uso agrícola.

Por otra parte las tasas de abatimiento para este periodo se pueden observar en la tabla 5.3 y se pueden observar en la figura 5.4. Las tasas de abatimiento permiten analizar mejor el comportamiento de los descensos del agua subterránea año con año. En este periodo se evaluó una fracción de 5 años (1995-2000) en los cuales se muestra una variación notable de dicha evolución. En este escenario los valores oscilan entre los 0.25 cm y los 0.75 cm por año. Situados estos en el área Centro y Este del acuífero, principalmente presentando valores altos los multipiezómetros 174, 559 y 562. Con una tasa de abatimiento muy cercana a 1 m. Afectando principalmente el áreas urbana de Jocotitlán.y específicamente la comunidad de Maboro.

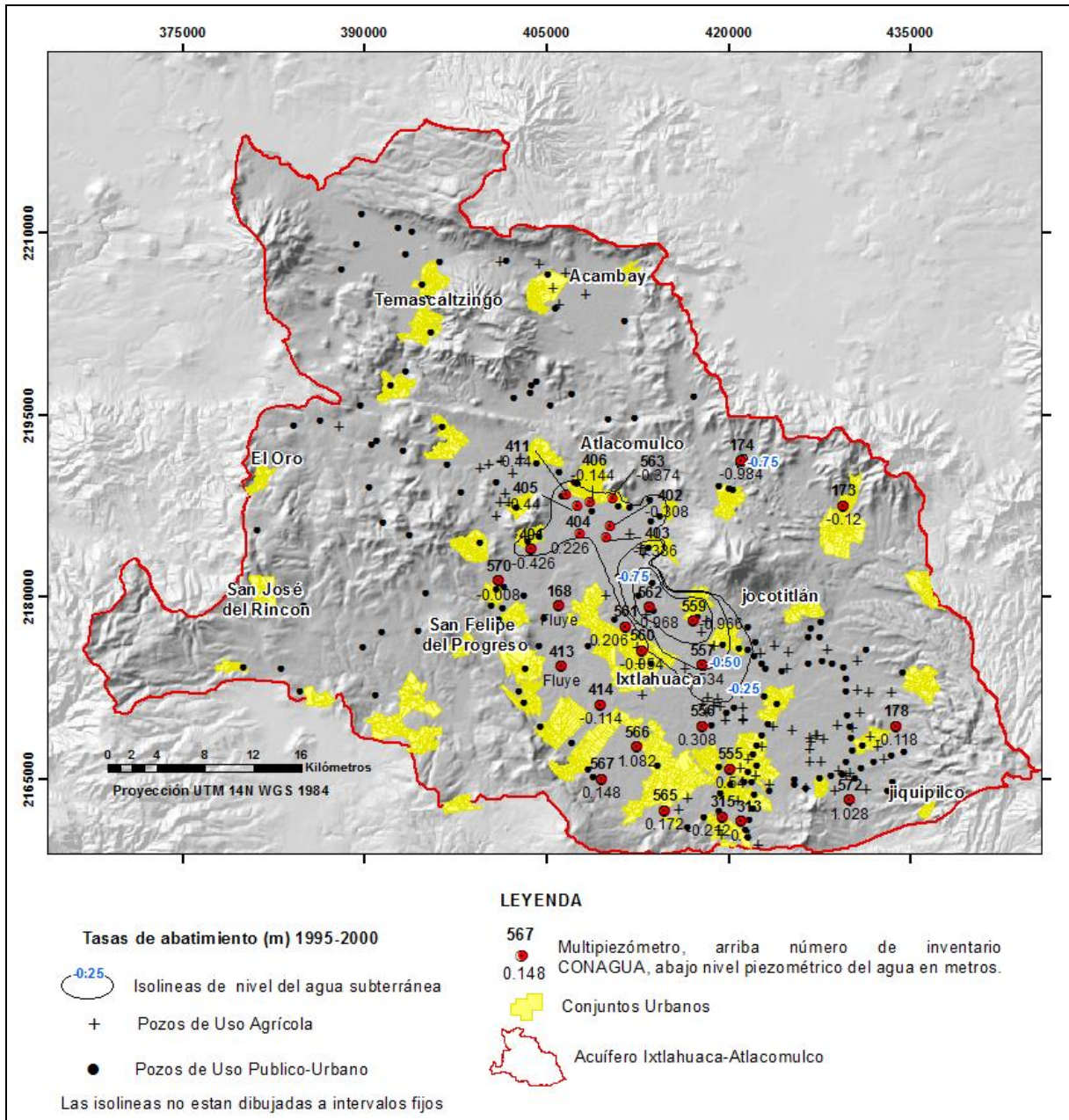
**Tabla 5.3** Abatimiento y tasas del nivel del agua subterránea para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010)

No. de Piezómetro	Coordenadas		Niveles (m)			
	Latitud (x)	Longitud (y)	1995	2000	Abatimiento	Ritmo 1995-2000
PL-173	-99,673	19,7819	44.26	44.86	-0.60	-0.12
PL-174	-99,7541	19,8153	47.04	51.96	-4.92	-0.984
PL-178	-99,6316	19,6178	50.23	50.82	-0.59	-0.118
PL-313	-99,7525	19,5466	44.76	42.76	2.00	0.4
PL-315	-99,7672	19,55	11.60	12.66	-1.06	-0.212
PL-401	-99,9191	19,7483	23.59	25.72	-2.13	-0.426
PL-402	-99,8561	19,7663	8.69	10.23	-1.54	-0.308
PL-403	-99,8597	19,7575	3.85	5.53	-1.68	-0.336
PL-404	-99,8805	19,76	1.32	0.19	1.13	0.226
PL-405	-99,8825	19,7808	7.06	9.26	-2.20	-0.44
PL-406-1	-99,8705	19,7786	12.18	12.90	-0.72	-0.144
PL-411	-99,8908	19,7894	8.22	10.42	-2.20	-0.44
PL-413	-99,8947	19,6616	Fluye	Fluye	Fluye	Fluye
PL-414	-99,8633	19,6328	10.62	11.19	-0.57	-0.114
PL-555	-99,7611	19,5856	26.35	23.65	2.70	0.54
PL-556	-99,783	19,6172	13.53	11.99	1.54	0.308
PL-557	-99,7833	19,6627	35.39	38.06	-2.67	-0.534
PL-559	-99,7908	19,6955	55.19	60.02	-4.83	-0.966
PL-560	-99,8313	19,6733	28.32	28.59	-0.27	-0.054
PL-561	-99,8438	19,6911	1.86	0.83	1.03	0.206
PL-562	-99,8258	19,7058	45.38	50.22	-4.84	-0.968
PL-563	-99,8547	19,7869	25.19	27.06	-1.87	-0.374
PL-565	-99,8133	19,5544	31.19	30.33	0.86	0.172
PL-566	-99,8352	19,6016	10.43	5.02	5.41	1.082
PL-567	-99,8619	19,5778	25.76	25.02	0.74	0.148
PL-570	-99,9441	19,7247	36.02	36.06	-0.04	-0.008
PL-572	-99,6672	19,563	29.93	24.79	5.14	1.028

Nota: Fluye.- El agua fluye a la superficie del terreno.



**Figura 5.3** Isolinias de abatimiento del AI-A para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010)



**Figura 5.4** Isolneas de las tasas de abatimiento del AI-A para el periodo 1995-2000 (Con base en CONAGUA, 2010)

En el periodo 2000-2005 los descensos de los niveles piezométricos se pueden reflejar en la tabla 5.4 y se pueden observar en la figura 5.5. Los abatimientos mayores a 2 metros se presentan en el extremo Sur y Centro del área. Para este periodo los abatimientos alcanzan 2.50 metros, esto para el multipiezómetro 570. Localizado en la región centro del área. Otro de los multipiezómetros que presenta un valor alto es el 555 con 2.49 metros. Localizándose este en el extremo Sur del acuífero y en la zona Este el multipiezómetro 174 presenta un valor un poco mayor a los 2 metros.

Los mayores abatimientos se localizan en regiones de los municipios de Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso, donde destacan los descensos de 2 metros. Esta región presenta una alta concentración de pozos de explotación de uso agrícola. En este escenario el comportamiento es alentador, ya que en este periodo los niveles se han recuperado en áreas que en el periodo anterior estaban caracterizados por abatimientos superiores a los 4 metros. Debido a la recuperación de los niveles piezométricos en este periodo, el número de Isolineas disminuye también.

Las tasas de abatimiento para este periodo se pueden reflejar en la tabla 5.4 y se pueden observar en la figura 5.6. En el periodo 200-2005 las tasas de abatimiento presentan un drástico cambio en su comportamiento en comparación con el periodo anterior, este periodo presenta un ritmo de abatimiento de 0.25 cm por año. Localizados en la zona Sur y Este del área, principalmente el multipiezómetros 174 con un valor de 0.40 cm y el 555 con un valor de 0.49 cm. Afectando principalmente las áreas de los municipios de Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso y mostrando recuperación en el municipios de Jocotitlán y en la comunidad de Maboro. La recuperación de los pozos podría ser debido a: que se dejaron de explotar algunos pozos del área, lluvias extraordinarias en este periodo, se abandonaron las tierras agrícolas de tipo mecanizado (Riego) o se dejó de extraer agua para el mismo, entre otras causas.

**Tabla 5.4** Abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 2000-2005 (Con base en CONAGUA, 2010).

No. de Piezómetro	Coordenadas		Niveles (m)			
	Latitud (x)	Longitud (y)	2000	2005	Abatimiento	Ritmo 2000-2005
PL-173	-99,673	19,7819	44.86	43.68	1.18	0.236
PL-174	-99,7541	19,8153	51.96	53.98	-2.02	-0.404
PL-178	-99,6316	19,6178	50.82	51.81	-0.99	-0.198
PL-313	-99,7525	19,5466	42.76	41.81	0.95	0.19
PL-315	-99,7672	19,55	12.66	11.25	1.41	0.282
PL-401	-99,9191	19,7483	25.72	24.90	0.82	0.164
PL-402	-99,8561	19,7663	10.23	10.23	0.00	0
PL-403	-99,8597	19,7575	5.53	5.46	0.07	0.014
PL-404	-99,8805	19,76	0.19	0.76	-0.57	-0.114
PL-405	-99,8825	19,7808	9.26	8.50	0.76	0.152
PL-406-1	-99,8705	19,7786	12.90	8.61	4.29	0.858
PL-411	-99,8908	19,7894	10.42	10.16	0.26	0.052
PL-413	-99,8947	19,6616	Fluye	Fluye	Fluye	Fluye
PL-414	-99,8633	19,6328	11.19	10.82	0.37	0.074
PL-555	-99,7611	19,5856	23.65	26.14	-2.49	-0.498
PL-556	-99,783	19,6172	11.99	11.94	0.05	0.01
PL-557	-99,7833	19,6627	38.06	34.62	3.44	0.688
PL-559	-99,7908	19,6955	60.02	58.30	1.72	0.344
PL-560	-99,8313	19,6733	28.59	29.31	-0.72	-0.144
PL-561	-99,8438	19,6911	0.83	0.69	0.14	0.028
PL-562	-99,8258	19,7058	50.22	47.68	2.54	0.508
PL-563	-99,8547	19,7869	27.06	27.10	-0.04	-0.008
PL-565	-99,8133	19,5544	30.33	27.62	2.71	0.542
PL-566	-99,8352	19,6016	5.02	6.26	-1.24	-0.248
PL-567	-99,8619	19,5778	25.02	24.83	0.19	0.038
PL-570	-99,9441	19,7247	36.06	38.56	-2.50	-0.5
PL-572	-99,6672	19,563	24.79	26.57	-1.78	-0.356

Nota: Fluye.- El agua fluye a la superficie del terreno.



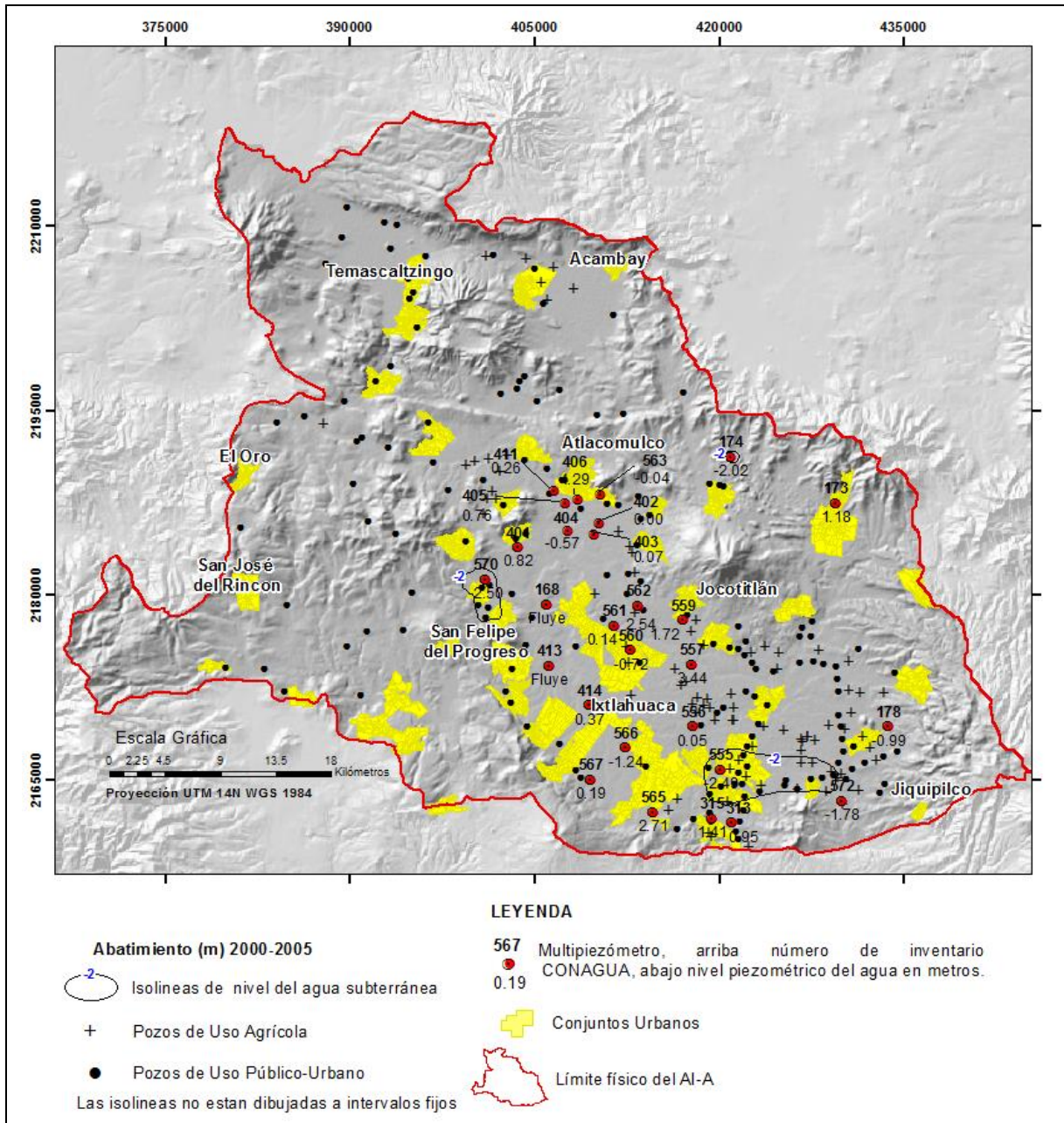


Figura 5.5 Isolinías de abatimiento del AI-A para el periodo 2000-2005 (Con base en CONAGUA, 2010).



En el periodo 2005-2010 los descensos de los niveles piezométricos se reflejan en la tabla 5.5 y se pueden observar en la figura 5.7. Los abatimientos mayores a 4 metros se presentan en el extremo Sur-Este y Centro del área. Para este periodo los descensos alcanzan 8.36 m., esto para el multipiezómetro 178. Localizado en la región Sur-Este del área. Localizado específicamente en la comunidad de San Felipe Santiago. Otro que presenta un descenso significativo es el 559 con valor de 4.51 m. Localizado en la región Centro del acuífero.

Los mayores abatimientos se localizan en regiones de los municipios de Ixtlahuaca de y Jocotitlán específicamente en la comunidad de Maboro, donde destacan los descensos de 2 y 4 m. Esta región presenta una alta concentración de pozos de explotación de uso agrícola. En este periodo el comportamiento es de llamar la atención pues se vuelven a producir descensos continuados en el área.

Las tasas de abatimiento para este periodo se pueden reflejar en la tabla 5.5 y se pueden observar en la figura 5.8. En el periodo 2005-2010 las tasas de abatimiento presentan un ritmo de abatimiento que va desde los 0.25 cm hasta 1.0 m por año. Localizados principalmente en la región Sur-este y Centro del acuífero. Principalmente el multipiezómetros 178 con un ritmo de abatimiento de 1.67 m por año y el 559 con 0.90 cm por año. Afectando las zonas urbanas de los municipios de Jocotitlán y Jiquipilco específicamente en la comunidad de San Felipe Santiago.

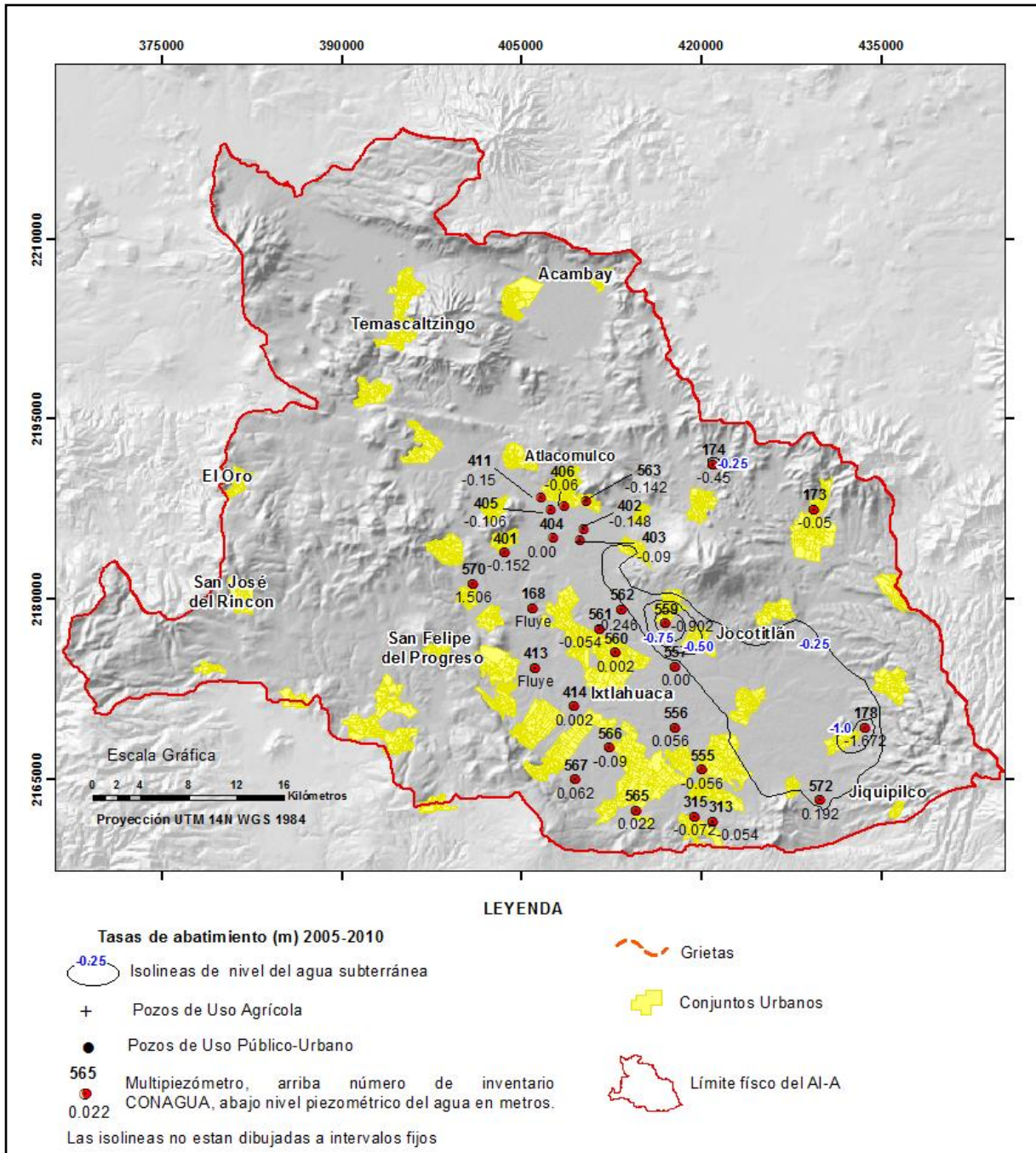
Cabe señalar que este escenario presenta características muy similares al periodo 1995-2000, en las mismas áreas y en los mismos multipiezómetros. En este caso el comportamiento no es muy alentador, lo cual permite pensar que un futuro no podría alcanzarse un equilibrio entre la extracción y la recarga del acuífero.

**Tabla 5.5** Abatimiento del nivel del agua subterránea para el periodo 2005-2010 (Con base en CONAGUA, 2010)

No. de Piezómetro	Coordenadas		Niveles (m)				Pronóstico 2030
	Latitud (x)	Longitud (y)	2005	2010	Abatimiento	Ritmo 2005-2010	
PL-173	-99,673	19,7819	43.68	43.93	-0.25	-0.05	-1
PL-174	-99,7541	19,8153	53.98	56.23	-2.25	-0.45	-9
PL-178	-99,6316	19,6178	51.81	60.17	-8.36	-1.672	-33.44
PL-313	-99,7525	19,5466	41.81	42.08	-0.27	-0.054	-1.08
PL-315	-99,7672	19,55	11.25	11.61	-0.36	-0.072	-1.44
PL-401	-99,9191	19,7483	24.90	25.66	-0.76	-0.152	-3.04
PL-402	-99,8561	19,7663	10.23	10.97	-0.74	-0.148	-2.96
PL-403	-99,8597	19,7575	5.46	5.91	-0.45	-0.09	-1.8
PL-404	-99,8805	19,76	0.76	0.76	0.00	0	0
PL-405	-99,8825	19,7808	8.50	9.03	-0.53	-0.106	-2.12
PL-406-1	-99,8705	19,7786	8.61	8.91	-0.30	-0.06	-1.2
PL-411	-99,8908	19,7894	10.16	10.91	-0.75	-0.15	-3
PL-413	-99,8947	19,6616	Fluye	Fluye	Fluye	Fluye	Fluye
PL-414	-99,8633	19,6328	10.82	10.81	0.01	0.002	0.04
PL-555	-99,7611	19,5856	26.14	26.42	-0.28	-0.056	-1.12
PL-556	-99,783	19,6172	11.94	11.66	0.28	0.056	1.12
PL-557	-99,7833	19,6627	34.62	34.62	0.00	0	0
PL-559	-99,7908	19,6955	58.30	62.81	-4.51	-0.902	-18.04
PL-560	-99,8313	19,6733	29.31	29.30	0.01	0.002	0.04
PL-561	-99,8438	19,6911	0.69	0.96	-0.27	-0.054	-1.08
PL-562	-99,8258	19,7058	47.68	48.91	-1.23	-0.246	-4.92
PL-563	-99,8547	19,7869	27.10	27.81	-0.71	-0.142	-2.84
PL-565	-99,8133	19,5544	27.62	27.51	0.11	0.022	0.44
PL-566	-99,8352	19,6016	6.26	6.71	-0.45	-0.09	-1.8
PL-567	-99,8619	19,5778	24.83	24.52	0.31	0.062	1.24
PL-570	-99,9441	19,7247	38.56	31.03	7.53	1.506	30.12
PL-572	-99,6672	19,563	26.57	25.61	0.96	0.192	3.84

Nota: Fluye.- El agua fluye a la superficie del terreno.





**Figura 5. 8** Isolinias de las tasas de abatimiento del AI-A para el periodo 2005-2010 (Con base en CONAGUA, 2010).

#### **5.4 SOBREPOSICIÓN DE TASAS ANUALES Y ABATIMIENTOS CON VARIABLES SOCIOECONÓMICAS (CONJUNTOS URBANOS, INDUSTRIAS), FÍSICAS (GEOLOGÍA) Y EFECTOS AMBIENTALES (GRIETAS).**

La sobreposición de las tasas anuales y abatimiento de los periodos evaluados: 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010 (figura 5.9) y su relación con las variables geográficas, se llevó a cabo con el fin de obtener un análisis más detallado de los factores que pueden ser la causa de los acusados descensos del agua subterránea en el AI-A, y a través de esto poder identificar las áreas con mayor necesidad de protección.

Las zonas con tasas anuales y abatimientos superiores a 0.25 cm se circunscriben al área del valle, donde se localizan materiales susceptibles (sedimentos lacustres) a hundimientos y agrietamientos. Estos agrietamientos se localizan precisamente en dicha área, lo que la relaciona con el proceso de extracción. Se observa como en la zona centro específicamente en el piezómetro No.559 coinciden las áreas con tasas y abatimientos elevados. Localizadas estas específicamente en la región del municipio de Jocotitlán y la comunidad de los Reyes.

Por otra parte, en la zona centro se presentan tasas de abatimiento menores a 25 cm., principalmente en las comunidades de San Miguel Tenochtitlán y el municipio de Atlacomulco de Fabela, aquí se puede ver la relación que hay entre la aglomeración de pozos, las áreas pobladas, la zona industrial y la geología, lo cual se relaciona al proceso de explotación. Cabe destacar que aunque no son áreas con altos índices de abatimientos, deben tomarse medidas encaminadas a minimizar posibles daños futuros.

Las grietas identificadas por CONAGUA se encuentran concentradas en áreas con tasa de abatimientos superiores a 0.25 cm. Localizadas en la región Sur-Este del área, afectando específicamente a la comunidad de Santa María del Llano. Aquí se puede observar la coincidencia de las grietas en zonas con presencia de materiales lacustre. Lo cual lo relaciona con el proceso de explotación. Aunque las grietas se encuentran situadas principalmente en la comunidad de Santa María del Llano, las áreas más susceptibles a sufrir agrietamientos son: Jocotitlán y los Reyes, que son las zonas donde se presentan los mayores abatimientos y las tasas anuales más altas.

Las zonas industriales y las áreas urbanas al igual que las variables físicas se circunscriben al área del valle, en regiones con abatimientos superiores a 0.25 cm, coinciden también en áreas con materiales lacustres. Lo cual se relaciona de la misma manera al proceso de explotación, por tal motivo se puede pensar que las cuarteaduras y problemas estructurales en algunas viviendas de estas áreas se pueden asociar al proceso de extracción. Y en un futuro se podrían generar zonas de riesgo debido a este proceso.

Para una mejor visualización del área de estudio se realizó una ampliación de los lugares donde se presentaron las isoclinas de abatimiento y tasas anuales, esto se observa en la figura 5.10



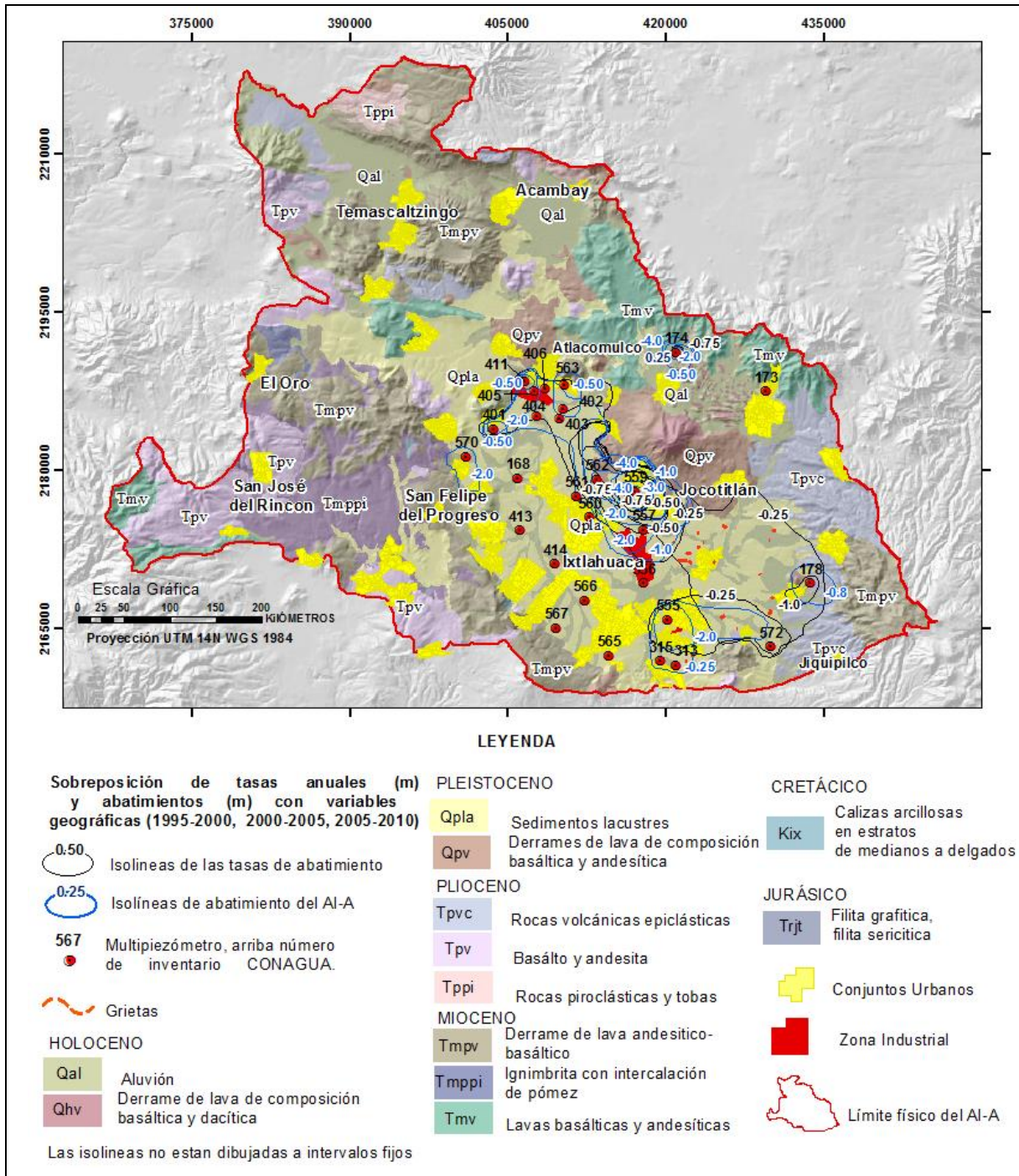


Figura 5.9 Sobreposición de tasas anuales y abatimientos con variables geográficas.

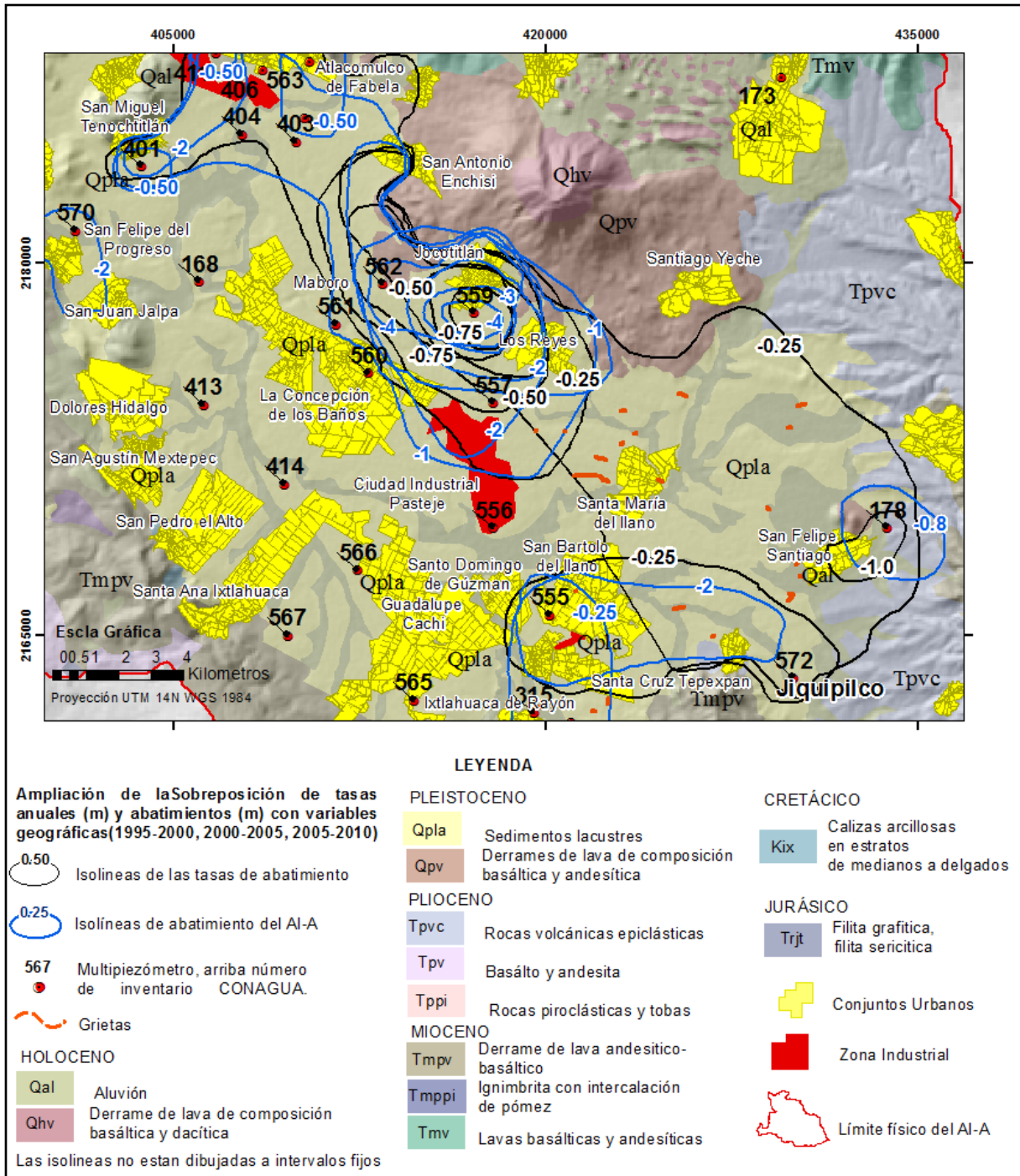


Figura 5.10 Ampliación de la Sobreposición de tasas anuales y de abatimientos con variables geográficas.

## **5.5 PRONÓSTICO PROSPECTIVO PARA EL AÑO 2030.**

El pronóstico para el año 2030 no es tan alentador, ya que de acuerdo al análisis prospectivo se siguen presentando abatimientos que van desde los 2 m. hasta los 30 m. principalmente en los multipiezómetros 559 y 178, el primero con un valor de 18.04 m. de abatimiento, localizado este en la zona centro del acuífero y el segundo con un valor de 33.44 m. de abatimiento, localizado en el extremo Sureste del área de estudio, siendo este el más alto. Esto se refleja en la tabla 5.5 y se observa en la figura 5.11

De seguir así estas tendencias, y si no se toman las medidas adecuadas al respecto, los principales abatimientos se seguirán presentando en las comunidades de Jocotitlán y San Felipe Santiago, de acuerdo a esto podemos decir que a medida que aumenta la población, la disponibilidad del agua ira disminuyendo año con año, por tal motivo los abatimientos serán cada vez mayores. De acuerdo a este análisis prospectivo, las tendencias en la disminución de los niveles piezométricos podrían aplicar a cualquier año futuro y los daños serán más perceptibles en lapsos mayores de tiempo.

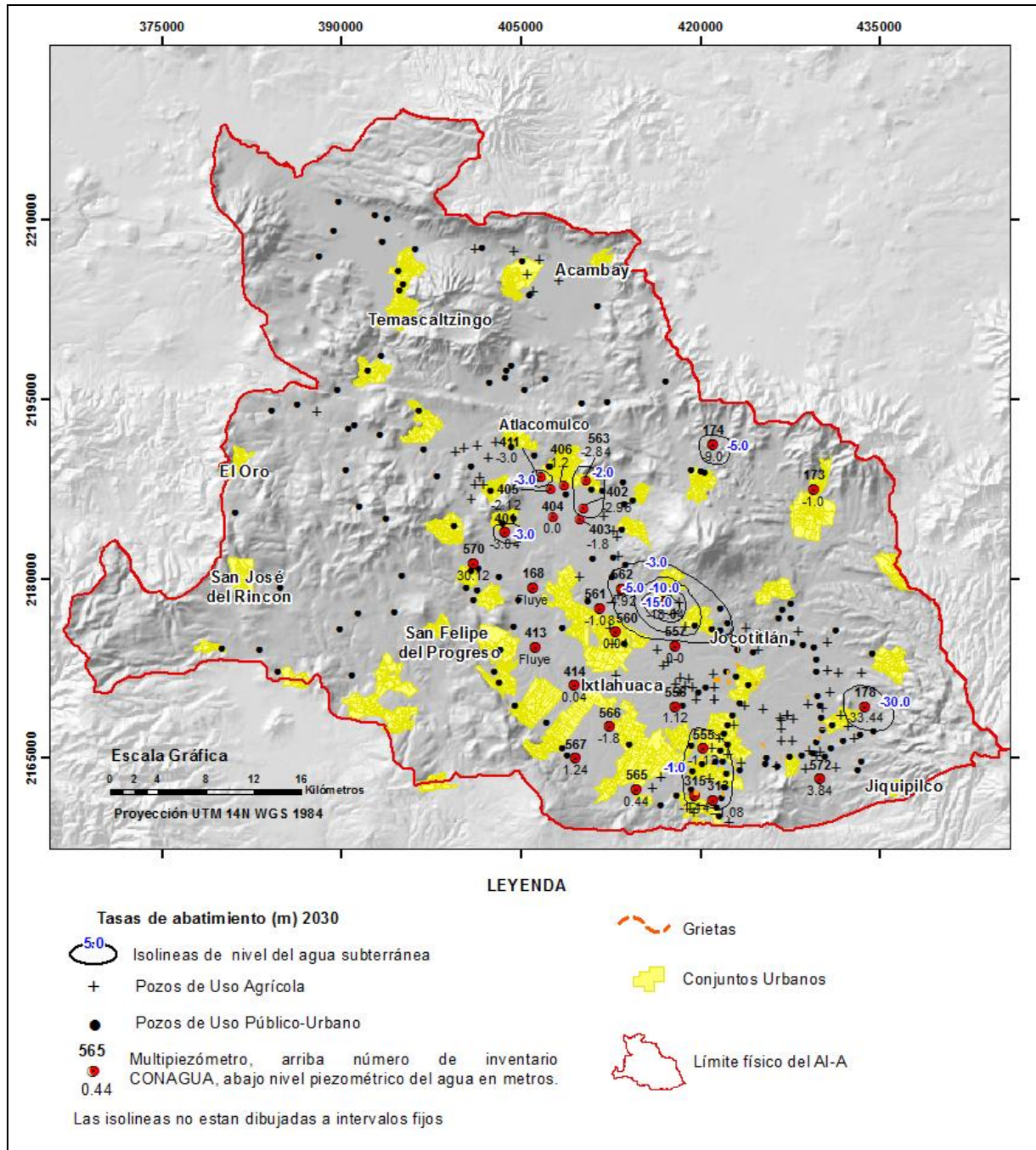


Figura 5.11 Proyección para el año 2030 (Elaboración propia).

## **5.6 FORMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN QUE PERMITAN MINIMIZAR LOS PROBLEMAS PRODUCIDOS POR LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL AI-A.**

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación, se proponen algunas alternativas de solución que deben ser consideradas en las áreas donde los niveles piezométricos llaman más la atención:

A nivel local y regional se recomienda implementar una cultura de preservación y conservación del recurso agua, la cual debe ser implementada en los programas educativos, con el fin de generar conciencia en el uso racional del agua. Así mismo la aplicación de la ley “el que contamina paga” y el pago justo por el servicio, incluidos la rehabilitación, saneamiento y conservación de cuencas hidrológicas

En los pozos donde se presenta una excesiva exploración del recurso hídrico, sería conveniente fomentar la inyección de aguas residuales tratadas en el subsuelo, esto con el fin de eliminar este tipo de aguas y por otra parte recargar los mantos acuíferos. El cumplimiento con las normas de calidad y la supervisión de personal especializado para la realización de esta propuesta, sería primordial para alcanzar las metas deseadas.

La creación de una oficina de gestión de recursos hídricos subterráneos en cada municipio, sería de suma relevancia. Esta oficina sería la encargada de monitorear, evaluar, supervisar y verificar el cumplimiento de los objetivos planteados en los planes y programas de desarrollo en materia de agua.

Para la modernización en la obtención de datos, sería muy conveniente a largo plazo la utilización de diver's y software especializados, ya que este tipo de registradores de datos de agua son precisos y confiables en el registro. Este tipo de registradores de datos proporcionan información en tiempo real de temperatura y nivel del agua.

Tomando en cuenta las tendencias actuales y la problemática que hoy en día se presenta debido a la sobreexplotación de los recursos subterráneos, se recomienda realizar un análisis y un diagnóstico de las áreas susceptibles al riesgo por agrietamiento del terreno, actualizando así la información e identificando las zonas susceptibles a sufrir daños ambientales.

# Capítulo 6

## Conclusiones y Recomendaciones

### 6.1 CONCLUSIONES

El área cuenta con 27 multipiezómetros de los cuales 24 son funcionales y tienen medidas sistemáticas, los multipiezómetros están localizados solamente en la región del valle del Acuífero Ixtlahuaca-Atlacomulco. La distribución de los multipiezómetros está en función a las comunidades urbanas, las zonas industriales y agrícolas.

Los principales abatimientos se localizan en la región centro y extremo este, con valores que alcanzan hasta los 30 m. esto se relaciona directamente con las áreas de mayor densidad de pozos.

El análisis de las tasas de abatimiento muestra que este proceso no ha sido constante en el tiempo. Lo anterior se refleja en las tasas de abatimiento mínimas durante el periodo 2000-2005, sin embargo para el último periodo analizado las tasas se han incrementado, lo que demuestra que debe prestarse atención urgente a este acuífero.

Las áreas donde se presentan problemas ambientales (agrietamientos) están caracterizadas principalmente por zonas urbanas y de cultivo, lo cual se relaciona con la explotación del agua subterránea. Los principales agrietamientos del terreno se desarrollan al este del área, englobados en abatimientos mayores a 0.5 m. lo que significa que no es necesario grandes abatimientos para grandes agrietamientos.

El pronóstico de los abatimientos para la región muestra que estos podrán alcanzar hasta los 30 m en el año 2030, lo que podrá generar mucho más agrietamientos debido a una mayor extracción de agua subterránea.

La sobreposición de las tasas anuales y abatimientos con variables geográficas, permitió: analizar, caracterizar e identificar las áreas de mayor susceptibilidad al proceso de explotación.

La utilización del método de triangulación para la elaboración de las isoclinas, fue el más adecuado en este caso, ya que mediante la interpolación de datos se pudieron obtener los resultados requeridos para esta investigación.

La utilización del SIG como herramienta para el análisis de los datos geográficos, fue parte importante para el desarrollo de este trabajo investigativo, ya permitió la sobreposición de diferentes variables, esto para obtener los resultados deseados en este documento.

A pesar de que la información de los datos piezométricos no fue homogénea, se pudieron obtener los resultados deseados en este trabajo investigativo.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación deben ser consideradas las siguientes recomendaciones:

- A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se recomienda realizar otras investigaciones enfocadas a adquirir información complementaria, que permita un mejor análisis de los niveles piezométricos, esto con el fin de identificar posibles áreas susceptibles al proceso de explotación
- Debido a que el acuífero se encuentra sobreexplotado, se deben tomar medidas adecuadas que permitan mantener el equilibrio entre la extracción y la recarga del acuífero, así como el balance de la extracción.



- En las áreas donde se presentan los mayores abatimientos, se recomienda realizar un nuevo análisis de riesgo por agrietamiento del terreno, tomando en cuenta las tendencias actuales del proceso de explotación.
- Realizar estudios similares a este en otros acuíferos que permitan hacer estudios comparativos.
- Para que la sociedad le dé la importancia que debe tener el agua y la use con responsabilidad, se tiene que crear una cultura permanente del cuidado del agua, en la cual se debe fomentar en cada individuo: costumbres, valores, hábitos y actitudes en el cuidado, preservación y conservación de los recursos hídricos.
- Trabajar conjuntamente población y gobierno en los temas relacionados con los recursos hídricos subterráneos, ya que la explotación de los recursos subterráneos es un problema de ambos.
- Utilización de tecnología adecuada para el tratamiento de aguas contaminadas, y la sustitución del agua potable que actualmente se utiliza para riego por agua residual tratada (darle un segundo uso al agua).
- Promover la utilización de accesorios hidráulicos eficientes y de bajo consumo.
- Crear sistemas eficientes en la cobranza, medición y aplicación de la ley “el que contamina paga” y “el pago justo por el servicio”, así como el uso racional del agua.
- Implementar campañas de detección y reparación de fugas en las viviendas y redes municipales.

- Tomar medidas de ordenamiento de la explotación de los acuíferos, tales como: reglamentos, zonas de veda, zonas de reserva y zonas reglamentadas.

## REFERENCIAS

Archivo Histórico del agua (AHA, 2009). El alto Lerma: sus transformaciones atreves del tiempo.

Arreguín, F. (2007). Impacto climático sobre los acuíferos mexicanos, memorias del 6° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

CONAGUA (2014). Comisión Nacional del Agua, Glosario. Disponible en: [www.cna.gob.mx/](http://www.cna.gob.mx/) (Consultado enero 2015).

CONAGUA (2013). Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, edición 2013, secretaria del medio ambiente y recursos naturales. Disponible en: [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-2-14Web.pdf) (Consultado: Enero 2015).

CONAGUA (2012). Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, edición 2012, secretaria del medio ambiente y recursos naturales.

CONAGUA (2012). Comisión Nacional del Agua, Atlas del Agua en México 2012. Disponible en: [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf) (Consultado agosto 2013).

CONAGUA (2011). Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, edición 2011, secretaria del medio ambiente y recursos naturales.

CONAGUA (2010). Comisión Nacional del Agua, Atlas del Agua en México 2010. Disponible en: [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf) (Consultado junio 2013).

CONAGUA (2010). Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del agua en México, edición 2010, secretaria del medio ambiente y recursos naturales.

CONAGUA (2010). Comisión Nacional del Agua, Glosario. Disponible en: [www.cna.gob.mx/](http://www.cna.gob.mx/) (Consultado septiembre 2013).

CONAGUA (2009). Comisión Nacional del Agua, Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea, Acuífero (1502) Ixtlahuaca-Atlacomulco, Estado de México. Subdirección general técnica, Subgerencia de evaluación y ordenamiento de acuíferos, México. DF.

CONAGUA (2002). Comisión Nacional del Agua, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero del Ixtlahuaca-Atlacomulco, Estado de México, Subdirección general técnica, Subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México. DF.

Colín, A. (2006). Abatimiento de manto freático en el Municipio de San Mateo Atenco 1970-2000. Tesis de licenciatura, UAEM.

Conrado, F.F, (2012). Análisis del estado del acuífero de Ixtlahuaca-Atlacomulco estado de México, mediante el uso de indicadores de sustentabilidad del agua subterránea. Universidad Autónoma del Estado de México.

Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2009). Proyecciones de la población de México, 2005-2050. México. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx> (Consulta: Agosto, 2009).

Custodio, E. (1996). Explotación Racional de las Aguas Subterráneas. Instituto de Geología y Paleontología. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. 21-48.

Diario Oficial de la Federación (DOF, 2009). Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional. Tomo DCLXXI, No. 20, 28 de agosto de 2009. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos.

Departamento de recursos naturales y ambientales de puerto rico (PUERTO DNRA), glosario de hidrología 2006-2012. Disponible en:

[www.drna.gobierno.pr/...hidrologia/glosario-de-hidrologia-de-puerto-ric](http://www.drna.gobierno.pr/...hidrologia/glosario-de-hidrologia-de-puerto-ric). (Consultado: Enero 2015).

Foster, S, (2002). Protección de la Calidad del Agua Subterránea, Guía para empresas de Agua, Autoridades Municipales y Agencias Ambientales. Banco Mundial, Programa asociado de la GWP, 115 PP.

Foster, S y R. Hirata, (1988). Determinación de riesgos de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS, Lima, Perú.

Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC (FCCyT, 2012). Disponible en:

[www.foroconsultivo.org.mx/](http://www.foroconsultivo.org.mx/)

Fernández, S, (2008). Incidencia de la sobreexplotación y salinización de los acuíferos en el abastecimiento de poblaciones. Instituto Tecnológico Geominero de España.

Fideicomiso para el Desarrollo de Parques y Zonas Industriales en el Estado de México (FIDEPAR, 2010). “Sistema de Información Estratégico para la Inversión de Negocios en el Sector Industrial del Estado de México”. Secretaría de Desarrollo Económico, Gobierno del Estado de México. Disponible en:

<http://www.edomex.gob.mx/fidepar#> (Consulta: Julio 20, 2010)

Gobierno del Estado de México (2007). El Agua, ciclo de un destino, Primera edición. Biblioteca Mexiquense del bicentenario. Toluca, Estado de México.

Gobierno del Estado de México (1991). Programa estatal de ordenamiento territorial. Secretaria de desarrollo urbano y metropolitano.

Garfias, J. M., Bibiano, L. y Llanos, (2008). Uso racional y Sostenible de los Recursos Hídricos del Acuífero del Valle de Toluca. Ciencia Ergo Sum, Vol. 15, núm. 001, marzo-junio, UAEM, Toluca, Estado de México, pp. 61-72. Disponible en:

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=10415107>> (Consultado: Septiembre 2013).

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA 2009). Agua subterránea. Disponible en:[http://www.imta.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=181:agua subterranea a&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80](http://www.imta.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=181:agua-subterranea-a&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=80) (Consulta: Junio, 2010).

Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM, 1994). Carta geológica del Estado de México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1996). I Censo de Población y Vivienda 1995, Estado de México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2001). XII Censo General de Población y Vivienda 2000, Estado de México. Tabulados Básicos, México, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2006). II Censo de Población y Vivienda 2005, Estado de México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2009). II Censo de Población y Vivienda 2010, Estado de México.

INAFED (Sistema Nacional de Información Municipal). (2009). Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Disponible en:

<http://www.inafed.gob.mx/wb/inafed09/snim> (Consulta Marzo 2013).

Juana B. Eweis. Soriana J. Ergas. (1999). Principios de Biorrecuperación “tratamientos para la descontaminación y regeneración de suelos y aguas subterráneas mediante procesos biológicos y físico químicos” Mc Graw Hill, España.

Köppen y García E., (1981). Atlas Nacional del Medio Físico, SPP.3

Korenfeld, S y J, Hernández. (2011). Proyecto de planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero, Revista digital universitaria. Volumen 12, numero 2, UNAM. México DF.

La Crónica de hoy (2009); México, en crisis de agua Sobreexplotación, la principal causa, Adolfo Sánchez Venegas. Disponible en:  
[www.cronica.com.mx/nota.php?id\\_nota=286481](http://www.cronica.com.mx/nota.php?id_nota=286481)+ (Consultado. Noviembre 2013).

Llamas, M. R. and Martínez, P. (2005). Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. Journal of water resources planning and management, ASCE, September - October, pp. 337-343.

López, V, S, (2010). Sobreexplotación del agua subterránea en el acuífero del valle de Toluca. Estado de México, 1968-2008, Universidad Autónoma del Estado de México.

Maderey Rascón, Laura Elena, (2005),”Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico”. Geografía para el siglo XXI, Año 1, numero1, (1-102). México, DF.UNAM.

Molinero Huguet, Jorge (2005), “clase: hidrología: Tipos de acuíferos”. Maestría de las Américas en Ingeniería del Agua. Universidad de Santiago de Compostela, Sevilla.

Navarro, I. (2006). Explotación y revocabilidad del agua subterránea en una cuenca semiárida del altiplano mexicano. Ciencia UANL, Octubre-Diciembre año/vol. IX, número 004. Universidad Autónoma de Nuevo León Monterrey, México. pp. 375-382.

Organización de las naciones unidas para la educación la ciencia y la cultura (UNESCO).  
Glosario de términos hidrogeológicos No.385. 2012 disponible en:  
[unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf) (Consultado. Enero: 2015).

Pulido, A. (1998). Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. Departamento de Hidrología, Universidad de Almería, España, pp. 115-132. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA 2010). Problemática del agua en el mundo.

Portal de geoinformación (CONABIO, 2012), Sistema nacional sobre biodiversidad.  
Disponible en:  
[www.conabio.gob.mx/informacion/gis/](http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/) (Consultada: marzo 2013).

Sahuquillo, A., Custodio, E. y Llamas (2006). DMA y la gestión del agua subterránea en España. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Catalunya.

Simone Graf Rey, Marcia, (2005) La escases del agua en el mundo y la importancia del acuífero guaraní para Sudamérica. Relación abundancia-escases, Centro Argentino de Estudios internacionales (CAEI), programa recursos naturales y desarrollo. Argentina.  
Disponible en:  
[www.caei.com.ar](http://www.caei.com.ar)

Sandoval, A, Campos, M. R. y Chávez, E. (2006). Participación social y Equidad de género en la gestión, usos y manejo integral y sustentable del agua en el Acuífero del Valle de Toluca Revista Enfoques, número 005, Universidad Central de Chile, Santiago de Chile, p.p. 131-140  
Disponible en:  
<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=96000507&iCveNum=9868>  
(Consultado: Septiembre 2013).

Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2011). La ciencia del agua para escuelas: agua subterránea. Disponible en:

[water.usgs.gov/gotita/earthgw.html](http://water.usgs.gov/gotita/earthgw.html)

UNITECNIA, S.A. de C.V., (1996). Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los Valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Edo de México; Comisión Nacional del Agua. 66 pp., planos y anexos; México.

## ANEXOS

Tabla A1. Multipiezómetros localizados en el área de estudio (CONAGUA, 2009)

No.	Multipiezómetros	Municipio	Coordenadas	
			Latitud (x)	Longitud (y)
PL-173	San Bartolo Morelos	San Bartolo Morelos	-99,673	19,7819
PL-174	Maxda-yondeje	Timilpan	-99,7541	19,8153
PL-178	San Bartolo Oxtotitlán	Jiquipilco	-99,6316	19,6178
PL-313	Km. 33 Carr. Tol-Qro	Ixtlahuaca	-99,7525	19,5466
PL-315	Cerca de la bomba pozo	Ixtlahuaca	-99,7672	19,55
PL-401	Poblado del Tunal	Jocotitlán	-99,9191	19,7483
PL-402	Rancho Cotecito	Atlacomulco	-99,8561	19,7663
PL-403	Ejido Caspi	Atlacomulco	-99,8597	19,7575
PL-404	El Río Abejas	Atlacomulco	-99,8805	19,76
PL-405	Rancho las Mercedes	Atlacomulco	-99,8825	19,7808
PL-406-1	Máquina Perforadora	Atlacomulco	-99,8705	19,7786
PL-411	Cruce Río Lerma	Atlacomulco	-99,8908	19,7894
PL-413	San José de la Venta	San Felipe del Progreso	-99,8947	19,6616
PL-414	San Antonio del Río	Ixtlahuaca	99,8633	19,6328
PL-555	San Bartolo del llano	Ixtlahuaca	-99,7611	19,5856
PL-556	Las Torres subestación	Ixtlahuaca	-99,783	19,6172
PL-557	Industrias Pasteje	Jocotitlán	-99,7833	19,6627
PL-559	Sta Clara Microhondas	Jocotitlán	-99,7908	19,6955
PL-560	Km. 3 camino san pedro	Ixtlahuaca	-99,8313	19,6733
PL-561	San José Villeje	Jocotitlán	-99,8438	19,6911
PL-562	Mavoro km. 116+600	Jocotitlán	-99,8258	19,7058
PL-563	Tecuác, Km 2+400	Atlacomulco	-99,8547	19,7869
PL-565	Ejido del Rincón	Ixtlahuaca	-99,8133	19,5544
PL-566	Rancho Vaquerias	Ixtlahuaca	-99,8352	19,6016
PL-567	San Andrés del Pedregal	San Felipe del Progreso	-99,8619	19,5778
PL-570	K 8+350	Jocotitlán	-99,9441	19,7247
PL-572	Ejido Mañi	Jiquipilco	-99,6672	19,563



Tabla A2. Coordenadas de los vértices del AI-A 1502 (CONAGUA, 2009)

VERTICE	LONGITUD OESTE			LONGITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	30	59.2	19	35	4.1	
2	99	42	17.7	19	31	49	
3	99	53	17.1	19	32	6.6	
4	99	54	52.3	19	33	52.6	
5	99	59	54	19	33	53.9	
6	100	2	10.9	19	32	48.7	
7	100	8	54.8	19	34	55.2	
8	100	14	15.6	19	33	57.6	DEL 8 AL 9 POR EL LIMITE ESTATAL
9	100	16	10.5	19	40	30.1	DEL 9 AL 10 POR EL LIMITE ESTATAL
10	100	7	20.2	20	2	21.7	DEL 10 AL 11 POR EL LIMITE ESTATAL
11	100	5	2.2	20	1	8.9	
12	100	2	17.8	19	59	29.3	
13	99	57	21	19	58	46.9	
14	99	38	18.1	19	48	40.5	
15	99	32	19.9	19	44	10	
16	99	34	8.7	19	39	18.6	
17	99	32	16.9	19	36	3.3	
1	99	30	59.2	19	35	4.1	

## Anexo de Fotografías del área de estudio



Figura A1 Pozo de extracción de agua del municipio de Ixtlahuaca



Figura A2 Agrietamientos en el municipio de Jocotitlán



Figura A3 Agrietamientos en el municipio de Jocotitlán



Figura A4 Pozo de extracción de la Magdalena comunidad de Jocotitlán